

PAALUN SIVUVASTUKSEN MITTAAMINEN



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Rakennustekniikka

Visamäki, kevät 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Mika Yli-Marttila".

Mika Yli-Marttila

VISAMÄKI
Rakennustekniikka
Infra

Tekijä	Mika Yli-Marttila	Vuosi 2018
Työn nimi	Paalun sivuvastuksen mittaaminen	
Työn ohjaaja	Jari Mustonen	

TIIVISTELMÄ

Työssä oli tarkoitus kehittää mittausmenetelmä, jolla voidaan mitata maan antamaa sivuvastusta yhden paalun tapauksessa kuormitettaessa paalua sivusuunnassa staattisesti. Työn teettäjänä oli SSAB Europe Oy/Infra.

Työssä kehitettiin testipaalu, joka ei koekuormitettaessa kanna kuormaa sivusuunnassa, vaan kaikki vastus, joka kuormituksessa syntyy, tulee maan antamasta vastuksesta. Täyden mittakaavan kenttäkokeissa kuormitettiin lyömällä asennettua teräsputkipaalua vaakasuunnassa erisuuruksilla kuormitusportailla ja mitattiin paalun yläpään vaakasiirtymää kuormituksen alaisena ja pysyvää siirtymää kuorman poistamisen jälkeen.

Työssä tarkasteltiin paalun yläpään vaakasiirtymää käsin laskemalla ja käyttäen työn tilaajan, SSAB Europe Oy:n, omaa RRPileCalc Advanced FEM -suunnitteluohjelmistoa.

Työn tarkoituksena oli yrittää määrittää mitatuista koetuloksista maan sivuvastus ilman maaperästä tehtäviä laajempia maaperäanalyysijä hyödyntämällä laskentaohjeista saatavaa tietoa. Tässä ei kuitenkaan saavutettu sitä, vaan jouduttiin toteamaan jo ennestään tiedossa oleva asia maaperän materiaaliarvojen suuresta hajonnasta verrattuna esimerkiksi teräksen vastaaviin arvoihin.

Avainsanat paalutus, sivukuormitettu paaluperustus, alustaluku

Sivut 42 s. + liitteet 24 s.

VISAMÄKI

Degree Programme in Construction Engineering

Author	Mika Yli-Marttila	Year 2018
Subject of Bachelor's thesis	The determination of the soil resistance	
Supervisor	Jari Mustonen	

ABSTRACT

The purpose of this Bachelor's thesis was to design a measuring method, which can be used to determine soil resistance resulting from the movement of the pile in a lateral direction. The thesis was commissioned by SSAB Europe Oy/Infra.

During the study a test pile with no moment resistance was developed. Instead, all the resistance was caused by the resistance provided by soil. The pile was equipped with a joint which has a rotation release. In the field tests the pile was loaded by various lateral forces. The displacement of the head of the pile under load and the permanent non-loaded displacement were measured.

The lateral displacement of the head of the pile was examined by calculating manually and with the help of design software called RRPileCalc Advanced FEM developed by SSAB Europe Oy.

The aim was to try to determine the soil resistance from the measured test results without wider soil analyses and by utilizing the information obtained from the calculations. However, a conclusion was drawn that this determination was not possible because the soil is non-homogenous material and the material values found in literature have high dispersion compared, for example, to the corresponding values of steel.

Keywords Laterally loaded pile, soil resistance, p-y curve

Pages 42 p. + appendices 24 p.

ALKULAUSE

Tämä työ tehtiin SSAB Europe Oy:n infratuoteryhmälle Hämeenlinnaan opinnäytetyönä Hämeenlinnan ammattikorkeakoulun rakennustekniikan koulutusohjelmassa.

Esitän kiitokseni työn valvojalle ja tarkastajalle lehtori Jari Mustoselle sekä ansiokkaasti eläköityneelle lehtori Tapio Korkeamäelle opinnäytetyön aiheesta ja siihen liittyvistä neuvoista.

Lisäksi haluan kiittää silloista tuotekehityspäällikkö Jukka Rantalaa ja teknologiapäällikkö Antti Perälää, jotka totesivat aiheen kiinnostavan heitä SSAB:lla. Kiitokset Antti Perälälle lukuisista neuvoista työn toteuttamisen aikana sekä opinnäytetyön sisältöön liittyvistä kommentteista. Tuotepäällikkö Teemu Yli-Koveroa kiitän kuormituskokeiden käytännön järjestelyistä liittyen aina paalujen toimituksesta niiden asennukseen testialueelle.

Erityisesti haluan kiittää vaimoani, joka on jaksanut kannustaa minua opintojen ja opinnäytetyön teon aikana. Arvostan suuresti hänen kärsivällisyytään käyttäessäni aikaa opintoihin, joka on ollut pois yhteisestä ajastamme. Kiitos hänelle. Nyt on aika nauttia kesästä ja ensimmäisestä lapsenlapsen tamme.

Kiitokset myös niille henkilöille Hämeen ammattikorkeakoulun Ohutlevykeskuksessa ja koulutuskeskus Tavastiassa, jotka ovat mahdollistaneet tämän työn tekemisen.

Hämeenlinnassa 31.5.2018

Tekijä



SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT	2
ALKULAUSE	3
MERKINNÄT	6
LYHENTEET	6
1 JOHDANTO.....	1
2 SIVUKUORMITETTU PAALUPERUSTUS.....	2
2.1 Yleistä maamekaniikan käsitteistä ja paalutuksesta	2
2.1.1 Maamekaniikka	2
2.1.2 Paalutuksen perusteoriaa	2
2.1.3 Paalujen jako niiden asennustavan ja toimintavan mukaan	3
2.1.4 Paalujen jako niiden materiaalien mukaan	4
2.2 Sivukuormitettuja paaluperustuksia	7
2.3 Paalun sivuvastus ja sivukuormituskapasiteetti	7
2.4 Paalun käyttäytyminen sivukuormituksessa.....	8
2.5 Pohjatutkimusten avulla selvittävät lähtötiedot.....	10
2.6 Painokairauksella selvittettäviä maaperän ominaisuuksia	10
2.7 Lujuusarvojen määrittäminen kairaustuloksista	13
3 PAALUN MITOITUS JA LASKENTAMENETELMÄT.....	15
3.1 Sivukuormitetun paaluperustuksen mitoitus	15
3.1.1 Murtorajatilamitoitus (geotekninen suunnittelu).....	15
3.1.2 Käyttöraajatilamitoitus	16
3.2 Geotekniikassa käytettävät laskentamenetelmät	16
3.3 Alustalukumenetelmä.....	17
3.4 Teräspaalun mitoitusohjelma RRPileCalc	20
3.5 Empiiriset koekuormitukseen perustuvat menetelmät	21
4 PAALUN KOEKUORMITUS VAAKASUUNNASSA	23
4.1 Taustaa paalun koekuormitukselle	23
4.2 Koekuormituksen suunnittelu	23
4.3 Koepaalujen asennus ja kokeen suoritus.....	25
4.4 Kuormitusten tulokset	27
4.5 Maan sivuvastuksen arviointi mittaustulosten avulla.....	30
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	33
LÄHTEET	34
Liite 1	Painokairausten tulokset koekuormitusalueelta
Liite 2	Koepaalujen valmistuskuva ja mitoituslaskelmat
Liite 3	Paalujen venymäliuskosten mittaustulokset
Liite 4	Sivusiirtymän laskenta Winklerin alustamallilla

MERKINNÄT

A	[m ²]	poikkipinta-ala
E	[MN/m ²]	materiaalin kimmomoduuli
H	[kN]	vaakakuorma
I	[m ⁴]	profiilin jäyhyysmomentti
L	[m]	paalun pituus
M	[kNm]	taivutusmomentti
c'	[kN/ m ²]	tehokas koheesio
c _u	[kN/m ²]	suljettu leikkauslujuus (käytetty myös merkintää s _u)
d	[mm]	paalun halkaisija tai sivun pituus
k _s	[kN/m ³]	alustaluku
m		moduuliluku
n _h	[kN/m ³]	alustalukukerroin
p _m	[kN/m ²]	sivuvastuksen/-kuormituksen ääriarvo
y	[m]	siirtymä
y _m	[m]	sivuvastuksen ääriarvon kehittymiseen vaadittava siirtymä
σ	[MPa]	materiaalissa vallitseva jännitys
σ'	[kN/m ²]	maan tehokas normaalijännitys
ε	[-]	venymä
γ	[kN/m ³]	maan tilavuuspaino
γ'	[kN/m ³]	maan tehokas tilavuuspaino
φ'	[°]	maan tehokas kitkakulma

LYHENTEET

LiVi	Liikennevirasto
RIL	Rakennusinsinööriliitto
RD-paalu	Maahan poraamalla asennettava paalu
RR-paalu	Maahan lyömällä asennettava paalu

1 JOHDANTO

Paalutuksella tarkoitetaan pohjarakennustekniikassa menetelmää, jolla huonosti kantavasta maaperästä tehdään rakennuskelpoista. Paalut välittävät yläpuolisilta kerroksilta tulevat kuormat huonosti kantavien maakerrosten läpi kantaviin maakerrokseen. (Kulmala 2013, 146.) Suomessa käytetään yleisimmin lyönti- tai porapaalutusta, joilla voidaan asentaa taloudellisesti ja tehokkaasti paaluja, joiden läpimitta on teräsbetonipaaluissa alle 500 mm ja teräsputkipaaluissa alle 300 mm. Paaluperustuksia käytetään, jos rakennuksen tai rakenteen perustaminen maan varaan ei painumien, siirtymien, kiertymien tai jonkun muun syyn vuoksi ole mahdollista. (Jääskeläinen 2009b, 52.)

Paalujen käyttö yleistyy jatkuvasti, koska kaupunkien ja taajamien laajentuessa joudutaan rakentamaan myös heikommin kantaville alueille. Toisaalta työvoimakustannusten nousu sekä paaluteollisuuden ja paalutuskoneiden kehitys ja niiden yleistymisen ovat tuoneet paalutuksen varteenotettavaksi vaihtoehdoksi myös niihin kohteisiin, jotka voitaisiin toteuttaa myös ilman paalutusta. Teräsbetoniset paalut ovat olleet yleisempiä, mutta teräspaalujen valmistajien aktiivisen kehitystyön seurauksena Suomessa on käytettävissä laaja valikoima erikokoisia ja erilujuusluokan teräspaaluja. (Jääskeläinen 2009b, 52.). Teräspaalujen kehityksessä varsinkin SSAB Europe Oy on tehnyt aktiivista kehitystyötä.

Rakennuskohteessa käytettävä paalutyyppejä valitaan vallitsevien pohjaolosuhteiden, kuormitusten sekä ympäröivien rakenteiden perusteella. Tarkoituksena on löytää mahdollisimman kustannustehokkain ratkaisu tarkasteltavaan kohteeseen. Paalutyypit jaetaan maata syrjäyttäviin ja maata syrjäyttämättömiin paaluihin. Maata syrjäyttäviin paaluihin voidaan katsoa teräsbetoniset lyöntipaalut, teräksiset lyöntipaalut, puupaalut sekä lyötävät avoimet paalut. Maata syrjäyttämättömiin paaluihin kuuluvat muun muassa kairinpaalut ja porattavat teräspaalut. (RIL 2011, 135.)

Tässä opinnäytetyössä kuormitettiin lyömällä asennettua normaalia teräsputkipaaluja ja työssä kehitettyä nivelellistä testipaaluja vaakasuunnassa erisuuruksilla kuormitusportaililla ja mitattiin paalun yläpään vaakasiirtymää kuormituksen alaisena ja pysyvää siirtymää kuorman poistamisen jälkeen. Lisäksi tarkasteltiin paalun yläpään vaakasiirtymää käsin laskemalla ja käyttäen työn tilaajan omaa suunnitteluohjelmistoa, RRPileCalc Advanced FEMiä.

Työn tarkoituksena oli suunnitella mittausmenetelmä, jota voidaan käyttää täyden mittakaavan kenttäkuormituskokeissa apuna selvittämään maan sivuvastusta paalun siirtyessä vaakasuunnassa.

2 SIVUKUORMITETTU PAALUPERUSTUS

2.1 Yleistä maamekaniikan käsitteistä ja paalutuksesta

Seuraavassa on kerrottu ensin lyhyesti maamekaniikasta, paalutuksesta, paaluista ja niiden asennuksesta sekä toimintatavasta.

2.1.1 Maamekaniikka

Maamekaniikka selittää maaperää makroskooppisilla fysikaalisilla malleilla. Sana mekaniikka viittaa fysiikan haaraan, jossa tutkitaan kappaleiden liikettä ja vuorovaikutusta. Newtonin lait liikkeen jatkuvuudesta, dynamiikasta ja voimasta sekä vastavoimasta ovat keskeisiä mekaniikan teorioita. (Ahokas & Oksanen 2015, 6-8.)

Maamekaniikan tutkimus on lähtenyt rakennustekniikan tarpeista, kun ihmisen on alkanut rakentaa rakennelmia maaperään, jonka tiedetään olevan haasteellinen. Kuivalle, kovalle maalle mäen päälle on helppo rakentaa talo, mutta junaradan rakentaminen pohjattomalle suolle vaatii paljon enemmän suunnittelua. (Ahokas & Oksanen 2015, 6-8.)

Termi *maamekaniikka* määritetään perinteisessä kirjallisuudessa mekaniiseen mallinnukseen ”siinä maapallon pintakerroksessa, joka tukee kasvin elämää”, joka maatalousteknologiassa käytettynä on oikea. Rakennusinsinöörit näkevät maamekaniikan kuitenkin laajempänä tieteenhaarana: syvyysuunnassa mennään kallioon saakka ja jopa sen sisälle ja sovelluksissa näkökulma laajenee mm. rakennuksiin, tierakentamiseen, patoihin ja jopa erilaisiin maastoajoneuvoihin. Rakennusinsinöörit käyttävätkin mieluummin termiä geotekniikka eli maanrakennusmekaniikka. (Ahokas & Oksanen 2015, 6-8.)

Geotekniikassa käsitellään maa- ja kallioperän teknisiä ominaisuuksia ja niiden soveltamista maa- ja pohjarakentamiseen sekä maa- ja pohjarakenteiden mitoitusmenetelmiä. Pohjarakentaminen taas käsittää rakennuksen ja rakenteiden perustusten lisäksi maanpinnan alapuolisten rakenteiden rakentamiseksi tarvittavat kaivu-, louhinta-, täyttö-, tiivistys-, lukitus- ja muut rakennustoimenpiteet sekä pysyvien pohjarakenteiden rakennustyöt. (Jääskeläinen 2009a, 13.)

Pysyvillä pohjarakenteilla tarkoitetaan rakennusten ja muiden rakenteiden perustuksia, maanvastaisia seinä- ja lattiarakenteita, kuivanapitorakenteita, routa- ja muita suojarakenteita, rakennettuja rakennuspohjia ynnä muita maarakenteita tai työnaikaisia kaivantojen tuenta-, pohjavedenalennus- ja suojarakenteita. (Slunga 2017, 669.)

2.1.2 Paalutuksen perusteoriaa

Kuten johdannossa todettiin, paalutuksen tarkoitus on vahvistaa maaperää,

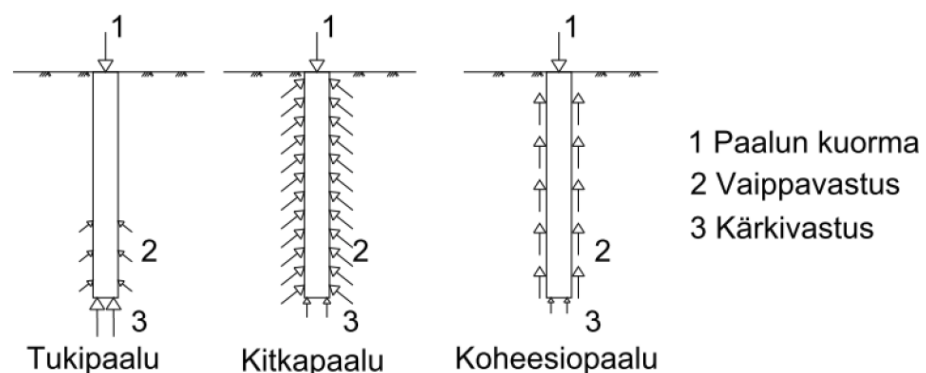
toisin sanoen lisätä maaperän kuormankantokykyä heikosti kantavilla alueille ja lisäksi estää rakennusten liiallinen ja epätasainen painuminen. Paalujen asentamista maaperään voidaankin verrata terästen asentamiseen betonin sekaan, jolla on tarkoituksena lisätä betonirakenteen kuormankantokykyä. Teräsbetonirakenteen analysointi voidaan tehdä teknistä taivutusteoriaa käyttäen suurimmassa osasta analysointitapauksia, kun taas paalun asennuksesta johtuva maaperän rakenteen muuttuminen paalun ympärillä tekee maaperän vahvistuksen analysoinnin monimutkaisemmaksi. (Poulos & Davis 1980, 1.)

Paaluperustusten suunnittelu lähtee yleisesti olettamuksesta, että niiden maaperään johtama kuorma tulee kohtisuoraan paalun akselia kohden. Useimmiten paaluun kuitenkin kohdistuu myös kuormitusta muista suunnista, esimerkiksi paalun yläpäähän vaakakuormaa ja taivutusta. (Hartman 2008, 10.)

Paalun geoteknisellä kantavuudella tarkoitetaan sen kykyä kantaa kuormaa ennen kuin maaperä antaa periksi, ja rakenteellisella kestävyydellä kykyä kantaa kuormaa ennen kuin itse paalu murtuu. (Jääskeläinen 2009b, 53.)

2.1.3 Paalujen jako niiden asennustavan ja toimintavan mukaan

Paalujen pääjako tehdään maata syrjäyttäviin ja maata syrjäyttämättömiin paaluihin. Lisäksi paaluja voidaan ryhmitellä toimintatavan, asennustavan ja materiaalin mukaan. Toimintatavaltaan paalut voivat olla tukipaaluja, kitkapaaluja tai koheesiopaaluja (ks. kuva 1 ja kuva 2). Paaluperusteisissa rakenteissa tulee ensisijaisesti selvittää tukipaalujen käyttömahdollisuus. Tukipaalu siirtää kuorman kärjen välityksellä kallioon tai tiiviiseen pohjakerrokseen. Osa kuormasta voi siirtyä myös vaippakitkan välityksellä ympäröivään maakerrokseen, mutta tämän osan suuruus on yleensä merkitykseltön. (Rasi-Koskinen, 2014, 16).



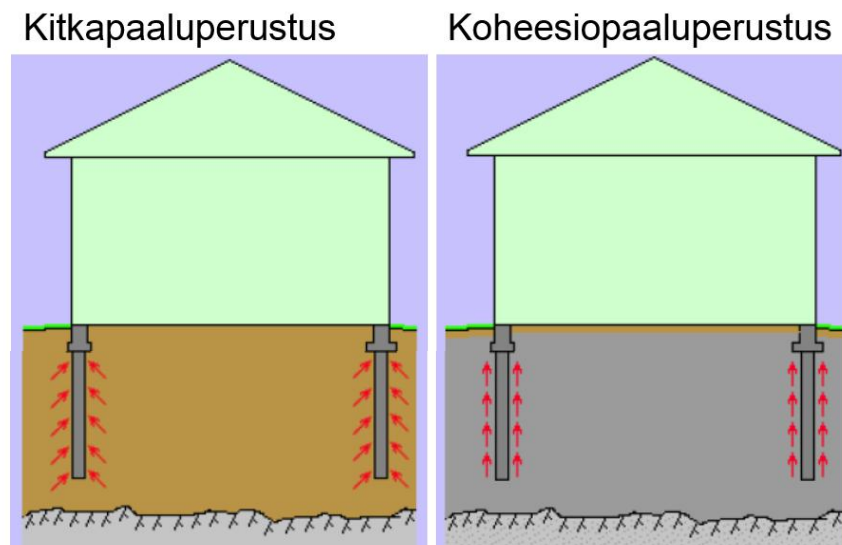
Kuva 1. Paalujen jako toimintatavan mukaan. (Rasi-Koskinen 2014, 16.)

Kitkapaalu siirtää pääosan kuormasta ulkopuolisen ja avoimen paalun tapauksessa myös sisäpuolisen vaippakitkan avulla ympäröivään kitkamaakerrokseen, ja osa kuormasta siirtyy myös putken kärjen välityksellä. Vaihtoehtoisesti kitkapaalu siirtää osan kuormasta ulkopuolisella vaippakitkalla,

ja osa kuormasta siirtyy paalun alapäähän muodostuneen maatulpan välityksellä. Maatulppa syntyy paalun sisään tunkeutuneen maan ja sisäpuolisen vaippapinnan kitkan vaikutuksesta. Kitkapaaluja käytettäessä perustettavien rakenteiden kuormitusjakauman tulee olla paalulle soveltuva, ja painumien sekä painumaerojen tulee pysyä rakenteen sallimissa rajoissa. (Rasi-Koskinen 2014, 15.)

Kitkapaalua käytetään niissä kohteissa, joissa pehmeä maakerros on niin paksu, että tukipaalujen käyttö ei ole taloudellisesti kannattavaa (Kulmala 2013, 153.) tai niitä ei pystytä asentamaan johtuen käytettävissä olevan asennuskaluston teknisistä rajoituksista.

Koheesiopaalussa kuorma siirretään vaippapinnalla syntyvän adheesio- ja kitkan välityksellä paalun kärkivastuksen ollessa hyvin pieni. Koheesiopaaluja voidaan käyttää pysyvissä rakenteissa ainoastaan silloin, kun koheesiomaakerros on erityisen paksu. Sallitut painumat ja painumien tasaisuus määrittävät koheesiopaalujen käyttökelpoisuuden. (Rasi-Koskinen 2014, 15). Tyypillisimmät koheesiopaalujen kohteet ovat työnaikaisissa rakenteissa ja penkereen vakavuuden lisäämisessä, joissa voidaan sallia suuriakin painumia (Kulmala 2013, 156). Koheesiopaalun materiaaliksi soveltuu parhaiten puu, koska puulla on suippeneva kartiomainen muoto, mikä parantaa maan ja paalun välistä otetta. (Jääskeläinen 2009b, 72).



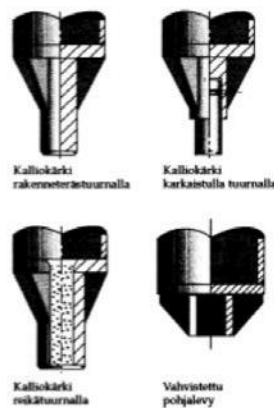
Kuva 2. Kitka- ja koheesiopaaluperustuksen toiminta kitka- ja koheesiomaassa (Kulmala 2013, 153-154 muokattu.)

2.1.4 Paalujen jako niiden materiaalien mukaan

Paalut voidaan ryhmitellä materiaalin mukaan puupaaluihin, teräsbetonipaaluihin tai teräspaaluihin. Teräsbetoni- ja teräspaaluja käytetään yleensä tukipaaluina, mutta niitä voidaan käyttää myös kitkapaaluina. Lyömällä asennettavien teräsbetonipaalujen tavallisin poikkileikkaus on neliö, jonka sivun pituus on 250 mm, 300 mm tai 350 mm. (Jääskeläinen 2009b, 53.) Puupaaluja käytetään nykyisin pääosin esimerkiksi työsilloissa, joita käytetään apuna työtasona rakennettaessa varsinaista siltaa vesistön ylitse.

Teräspaaluina käytetään yleensä onttoja putkia, valssattuja profiileja sekä nelikulmaisia tai pyöreitä massiivisia teräksiä. Yleensä teräsputkipaalut myös betonoidaan ja raudoitetaan sisältä (Rasi-Koskinen 2014, 16.)

Teräspaalut luokitellaan pienpaaluihin ja suurpaaluihin halkaisijan mukaan. Halkaisijaltaan vähintään 300 mm:n paalut ovat suurpaaluja, joiden pituudet voivat olla aina 39 metriin saakka, jolloin paalua ei tarvitse välttämättä jatkaa. SSAB Europe Oy voi toimittaa tarvittaessa myös 50 m pitkiä paaluja tehdasjatkoksella. Suurpaalujen maksimihalkaisija on 1200 mm Suomessa kierresaumalla valmistettuna. Maailmalla saatetaan valmistaa tätäkin suurempia. Teräspaalut voidaan asentaa lyömällä joko kärjestään avoimena tai suljettuna. Yleensä käytetään joko maa tai kalliokärkeä (ks. kuva 3). (Kulmala 2013, 165.)



Kuva 3. Esimerkkejä teräspaalun kärjistä. (Kulmala 2013, 165.)

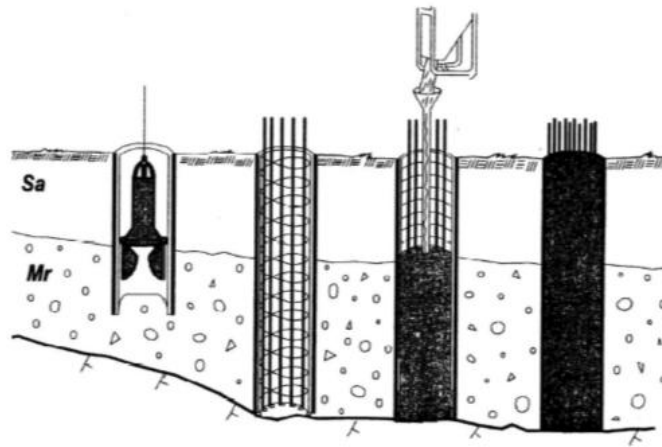
Teräspaalujen käyttö etenkin pientalokohteissa on lisääntynyt. Niissä saadaan paalujen kantavuudet optimoitua tehokkaasti ja voidaan käyttää esimerkiksi kuistien kohdalla pienempää paalukokoa, jolloin ylimitoitettujen paalujen käyttö ei aiheuta ylimääräisiä kustannuksia. Lisäksi paalujen asennus onnistuu pienellä kalustolla, jolloin aiheutetaan vähemmän tärinärasitusta lähirakenteille (SSAB 2017). Alla on valokuva (kuva 4) teräspaalun asennuksesta tämän opinnäytetyön kokeellista osuutta varten.



Kuva 4. RR90-paalun asennusta koekuormitusta varten (Kuvaaja Teemu Yli-Kovero).

Maata syrjäyttävät paalut asennetaan maahan lyömällä, täryttämällä, puristamalla, ruuvaamalla tai näiden yhdistelmällä. Teräksiset ruuvipaalut ovat maahan kiertämällä asennettavia paaluja (Rasi-Koskinen 2014, 18.)

Maata syrjäyttämättömät paalut tehdään maahan joko kaivamalla tai poraamalla. Kaivinpaalun ensimmäisessä työvaiheessa painetaan tai lyödään maahan alapäästään avointa työputkea samalla kun putkea hierretään edestakaisin pysty akselinsa ympäri. Putken sisälle tunkeutuva maa-aines poistetaan putken upotuksen edistyessä. Kun haluttu kaivussyvyys on saavutettu, asennetaan putkeen rauditus ja paalu betonoidaan yleensä vedenalaista betonointimenetelmää käyttäen samalla työputkea ylös nostaen, kunnes paalu on valmis. (Rasi-Koskinen 2014, 18.) Kaivinpaalun työvaiheet on esitetty alla olevassa kuvassa (kuva 5).



Kuva 5. Kaivinpaalun työvaiheet (Kulmala, 2013).

Paalujen porauksessa paalu tunkeutuu maahan pyöryksen, alaspäin suuntautuvan voiman sekä mahdollisen huuhtelun ja lyönnin yhdistelmällä. Porapaalut tehdään yleensä kallioon tukeutuvina tukipaaluina, jolloin paalun lujuus voidaan hyödyntää tehokkaasti (Rasi-Koskinen 2014, 18). Porapaalujen käyttö varsinkin korjausrakentamisessa on viime aikoina yleistynyt, koska kalustolla pystytään toimimaan matalissakin tiloissa (ks. kuva 6). (Kulmala 2013, 163).



Kuva 6. Pienpaalun asennusta poraamalla rakennuksen sisällä (Kulmala 2013, 167.)

2.2 Sivukuormitettuja paaluperustuksia

Tyypillisimpiä rakenteita, joissa sivusuuntainen kuormitus halutaan ottaa vastaan hyödyntämällä paalun sivukapasiteettia ja joissa sivusuuntaisen kuorman osuus kokonaiskuormasta on suuri, ovat

- valaisinpylväät
- riista-aidat
- mainostaulut
- meluesteseinät
- erilaiset pylväasperustukset
- sähköradan kannatinpylväät, portaalit ja opasteet
- siltojen perustusten tukipaalut.

Näissä rakenteissa yleensä mitoittavaksi kriteeriksi muodostuu sallittu vaakasiirtymä tai perustuksen kiertymä.

Vuonna 2016 valmistui Liikenneviraston teettämänä ohje (Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje. Liikenneviraston ohjeita 32/2016, LIVI/7462/06.04.01/2016) sivukuormitettujen pylväasperusteiden suunnittelua varten. Tätä ohjetta noudatetaan teiden ja ratojen meluesteiden, valaisinmastojen ja portaalien sekä sähköradan kannatinpylväiden ja -portaalien ja ratojen opastimien perustamisen suunnittelussa. Ohje on laadittu erityisesti geoteknistä suunnittelua varten. Rakenneteknisen suunnittelun osalta on esitetty ainoastaan täsmennykset Liikenneviraston teräs- ja betonirakenteita mitoittavasta koskeviin ohjeisiin, jotka perustuvat Eurokoodeihin (Nummelin & Tolla 2016, 3).

Ohjeessa ei käsitellä valaisinpylväitä, riista-aitoja, vakiokokoisia liikenne-merkkejä ja opasteita tai muita näihin verrattavia pieniä varusteita. Sähköradan kannatinpylväiden ja portaalien geotekniseen suunnitteluun tämä on uusi Liikenneviraston ohje (Nummelin & Tolla 2016, 3). Ohjeen luvussa 7 käsitellään paaluperustuksia.

Luvussa 3 käsitellään vielä paalun mitoittamista ja laskentamenetelmiä siltä osin kuin se on tämän opinnäytetyön kannalta tarpeellista.

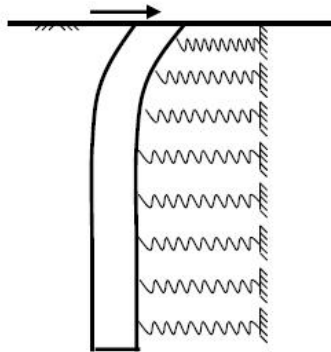
2.3 Paalun sivuvastus ja sivukuormituskapasiteetti

Paalun sivukuormakestävyydellä tarkoitetaan paalun sietämää suurinta vaakakuormitusta, kun otetaan huomioon maan kestokyky, paalun sallittu taivutusmomentti ja suurin sallittu siirtymä. Paalun sivukuormitus tai sivuvastus aiheutuu maan ja paalun liikkeistä toistensa suhteen. Kuormituksesta puhutaan, kun maa kuormittaa paalua, ja vastuksesta puhutaan, kun maa vastustaa paalun siirtymää. Sivukapasiteettiin vaikuttavat paalua ympäröivien maakerrosten lujuus ja jäykkyys, paalun pään kiinnitysaste sekä paalun oma taivutusjäykkyys. (Luukkonen 2015, 51.)

Paalulle syntyy sivukuormitusta, kun paalun sivukapasiteettia tai momenttikapasiteettia halutaan käyttää hyväksi tai kun maa liikkuu paalua kohti.

Sivukuormitusta paalulle voi aiheuttaa muun muassa paalutusalueella liikuvat työkoneet, paalulle tulevan pystykuorman epäkeskeisyys sekä maan painuminen vinopaalujen ympärillä ja paalun käyryys. Nämä rasitukset on otettava huomioon paalun rakenteellisessa mitoituksessa. (Rasi-Koskinen 2014, 19.)

Maan käyttäytyminen sivukuormitetun paaluperustuksen ympärillä ei ole lineaarista, vaan maan paaluun kohdistamaan sivuvastukseen vaikuttavat maan lujuusominaisuuksien lisäksi myös rakenteen siirtymät. Vaakakuormien tai -siirtymien rasittamien paalujen mitoitus täytyy tehdä käyttämällä rakennemallia, joka ottaa huomioon sekä paalun että maan muodonmuutosominaisuudet. Tämä voi tapahtua esimerkiksi kuvaamalla maan ominaisuuksia paalua tukevilla jousilla (ks. kuva 7). Paalua ympäröivä maa korvataan yksittäisten kimmoisien jousien muodostamalla jousisarjalla, missä jousien jäykkyyksiä kuvataan alustaluvuilla. Tätä mitoitusmenetelmää kutsutaan yleisesti alustalukumenetelmäksi. (Nummelin & Tolla 2016, 34.) Menetelmää käsitellään tarkemmin kohdassa 3.2.



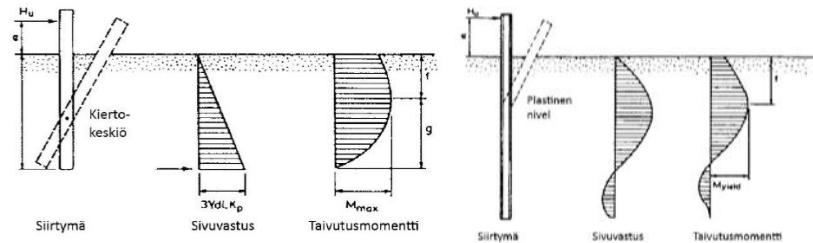
Kuva 7. Vaakasuuntaisesti kuormitettu paaluperustus, jossa paalua ympäröivä maa on kuvattu jousilla (Huang 2011, 29).

Pylväsperustuksina toimivat paalut ovat yleensä suhteellisen lyhyitä paaluja, jolloin paalu kiertyy maassa lähes jäykkänä kappaleena kiertokeskiönsä ympäri (ks. kuva 8) ympärillä olevan maan lujuuden pettäessä ennen paalun rakenteellista lujuutta. Kiertokeskiön sijainti riippuu kuormituksen suuruudesta sekä maan ja paalun jäykkyydestä.

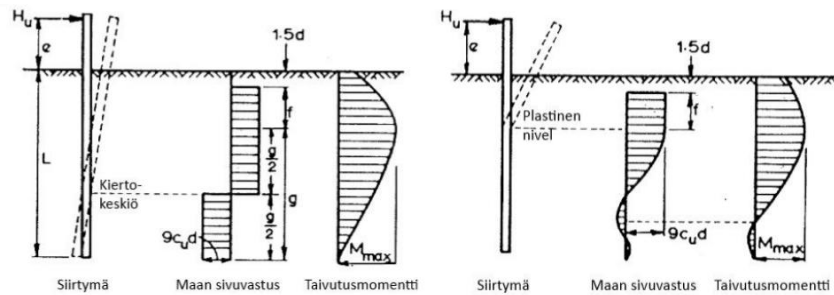
2.4 Paalun käyttäytyminen sivukuormituksessa

Yläpäästään vapaan vaakakuormitetun paalun käyttäytymisen analysointi perustuu siihen, että vaakakuormitus aiheuttaa maassa ulkoista kuormitusta vastustavia voimia. Tämän sivuvastuksen suuruus ja jakautuminen riippuvat maan ja paalun suhteellisesta jäykkyydestä sekä paalun kiinnityksestä rakenteeseen. Paalun suhteelliseen jäykkyyteen vaikuttavat paalun jäykkyys, ympäröivän maan jäykkyys ja paalun pituus. Sivukuormitetut paalut luokitellaan murtomekanismin perusteella lyhyisiin ja jäykkiin sekä pitkiin ja taipuisiin paaluihin, kuten kuvissa 8 ja 9 on esitetty. (Luukkonen 2015, 45). Suhteellisesti lyhyillä paaluilla pääsääntöisesti maa murtuu ennen kuin paalu menettää kantokykynsä (ks. kuva 8).

Koheesiomaassa paalun sivuvastus ja -kuorma saadaan maan leikkauslujuuden perusteella ja se on riippuvainen kuormituksen pituudesta. Kitkamaassa sivuvastuksen ja -kuorman suuruus on taas riippuvainen maan tilavuuspainosta, paalun halkaisijasta ja passiivipainekertoimesta. Koheesiomaassa sivuvastus alkaa vaikuttaa paaluun syvyydellä 1,5 kertaa paalun halkaisija (ks. kuva 8), kitkamaassa (ks. kuva 9) puolestaan heti maanpinnasta kasvaen syvyyden mukana. (Luukkonen 2015, 46)

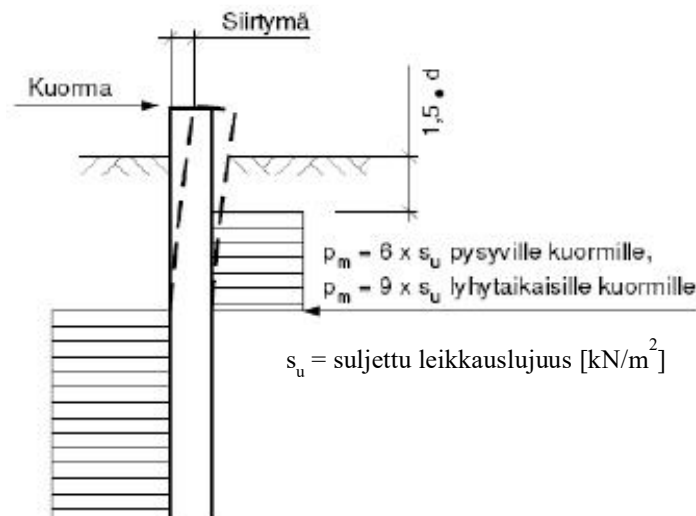


Kuva 8. Jäykkyysuhteen vaikutus paalun murtomekanismiin ja rasitukseen kitkamaassa. Vasemmalla lyhyt ja oikealla pitkä paalu. (Luukkonen 2015, 46.)



Kuva 9. Jäykkyysuhteen vaikutus paalun murtomekanismiin ja rasitukseen koheesiomaassa. Vasemmalla lyhyt ja oikealla pitkä paalu. (Luukkonen 2015, s. 46.)

Koheesiomaassa sivuvastuksen ja sivukuormituksen suuruus on riippuvainen myös kuorman kestosta (lyhytaikaisille kuormille murtoarvot ovat suuremmat). (Hartman 2008, 19)



Kuva 10. Sivuvastuksen murtoarvot p_m koheesiomaassa. (Hartman 2008, 19.)

2.5 Pohjatutkimusten avulla selvittävät lähtötiedot

Pohjatutkimusten avulla selvitetään kohteen geoteknistä suunnittelua varten rakennuspaikan maa- ja kallioperän rakennetta ja ominaisuuksia, kuten esimerkiksi maaperän kerrosjärjestyksiä, kerrospaksuuksia, kerrosominaisuuksia ja kalliopinnan asemaa sekä pohjaveden esiintymistä alueella. Tavoitteena on näiden ominaisuuksien avulla suunnitella ja toteuttaa rakenteiden vaatimat perustukset kantamaan niille tulevat kuormat turvallisesti ja taloudellisesti ympäristölle vahinkoa aiheuttamatta (Rantamäki;Jääskeläinen & Tammirinne 1979, 257.)

Käytettäviä tutkimusmenetelmiä ovat esimerkiksi kairaukset, koekuopan kaivu, näytteenotto ja pohjavesitutkimukset sekä ennen varsinaisia pohjatutkimuksia suoritettavat alustavat silmämääräiset maastokatselmut. Tietämys pohjaolosuhteista on riippuvainen kohteessa tehtyjen pohjatutkimusten laajuudesta ja laadusta (Rantamäki, Jääskeläinen & Tammirinne 1979, 257 ja Koivula 2016, 15).

Koekuoppa on luotettavin tapa selvittää maaperän ominaisuuksia, mutta sen avulla on taloudellisesti kannattamatonta mennä 2 – 3 m syvemmälle. Nykyisin yleisemmin käytetyt pohjatutkimusmenetelmät ovat kairaukset. Kuvassa 11 on esitetty yleisimmin käytössä olevat kairausmenetelmät ja niiden sovelluskohteet. (Rantamäki;Jääskeläinen & Tammirinne 1979, 258.)

Kairausmenetelmän pääasiallinen käyttötarkoitus	Selvitettävä seikka								
		Kallion pinnan sijainti	Tiiviin pohjakerroksen sijainti	Tiiviydeltään erilaisten maakerrosten rajat	Maakerrosten lujuus likimäärin	Maakerrosten lujuus tarkasti	Maakerrosten tiiviys likimäärin	Maalajiryhmä	Lyöntipaaluipituuden arviointi
Kairausmenetelmät									
Painokairaus	●	○	●	●	○		●	●	○
Heijarikairaus	○	○	●	○	○		●	○	●
Puristinkairaus			○	●	●		●	●	○
Siipikairaus						●			
Tärykairaus		○	●					○	○
Porakonekairaus (paineilmakairaus)		●	○						○

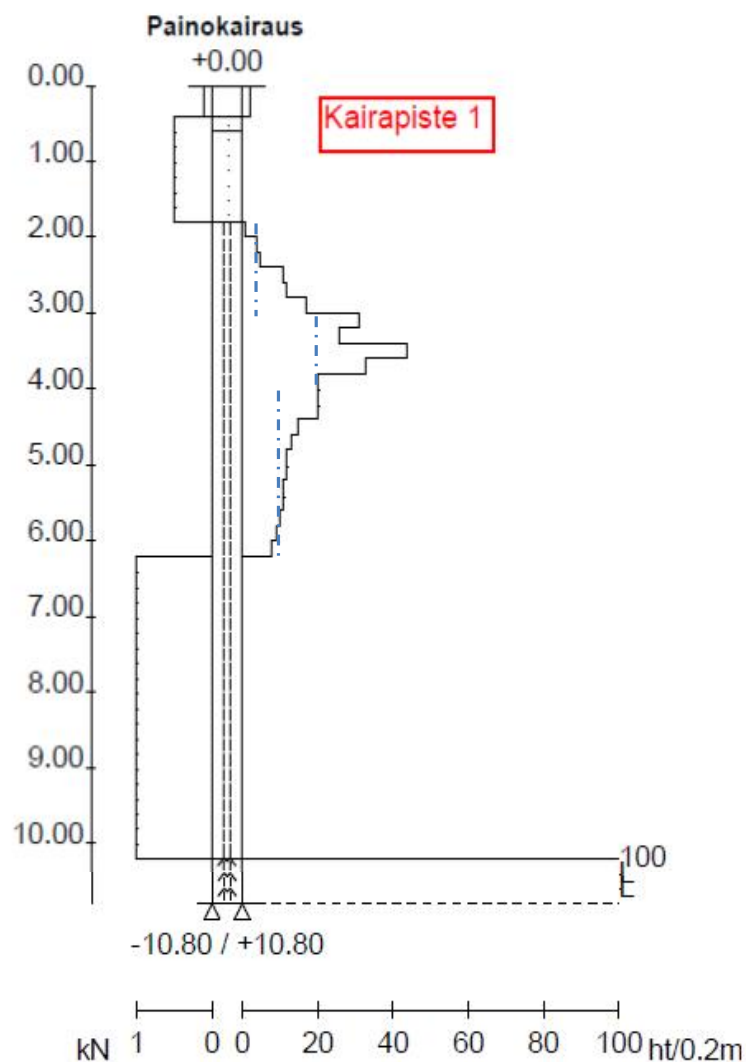
Kuva 11. Yleisemmät kairausmenetelmät ja niiden suositeltava käyttö (Jääskeläinen 2009a, 241.)

2.6 Painokairauksella selvittettäviä maaperän ominaisuuksia

Painokairaus on yleisin Suomessa käytetty kairausmenetelmä, jonka avulla voidaan arvioida tunkeutumiseen tarvittavan voiman avulla maaperän lu-

juusominaisuuksia sekä tunnistaa maalajien rajat. Savimaiden leikkauslujuudestakin saadaan sen avulla karkeaa tietoa, mutta siipikaira on varsinainen leikkauslujuuden mittauslaite. Alun perin painokairaus tehtiin käsin kääntämällä tankoa, jonka päässä on kärkikappale. Nykyisin käytetään telaketjuilla varustettua koneellista kairausvanua.

Kuvassa 12 on esitetty opinnäytetyössä käytetyn koekuormituspaikan yhden kairauspisteen tuloksista piirretty kairausdiagrammi. Diagrammi piirretään yleensä pystysuunnassa mittakaavaan 1:100. Kuvaajaan on keskelle sijoitettu maalajipylväs, johon merkitään kullakin syvyydellä olevan maalajin piirustusmerkki. Pylvään vasemmalle puolelle piirretään tulokset silloin, kun painuma on tapahtunut pelkillä painoilla. Oikealle puolelle piirretään puolikierrosten lukumäärä jokaista 20 cm:n suuruista painumaa kohden. Kairan kuormituksena on 1 kN:n kuorma.



Kuva 12. Kairausdiagrammi, jossa on esitetty painokairauksen tulokset koekuormitusalueen kairapisteeltä 1.

Diagrammista voidaan nähdä, että ensimmäisellä kahdella metrillä kaira on painunut maahan 0,5 kN:n kuormalla. Kahdesta kolmeen metriin kairaa on kierretty 1 kN:n kuormalla keskimäärin 5 puolikierrosta jokaista 20 cm:n painumaa kohti. Välillä kolmesta neljään metriin puolikierrosten määrä on keskimäärin 20 ja neljästä kuuteen metriin 10. Kuudesta kymmeneen metriin kaira on painunut maahan 1 kN:n kuormalla. Kymmenen metrin syvyydessä kaira ei ole enää uponnut kiertämällä, ja puolikierrosten määrän ylittäessä 100 on kairaa upotettu lyömällä. Tätä kuvaa merkintä L diagrammissa.

Maalajien kerrosrajoja ja maalajeja on arvioitu tässä kohteessa kairauksen äänihavaintojen ja kairausvastuksen muutosten perusteella sekä kairausreistä nousseen maan ulkonäön perusteella. Pällimmäisenä kerroksena on noin 40 cm humusta, jonka alla on turvetta kahden metrin syvyyteen saakka. Lisäksi voidaan päätellä kairausvastuksen ja taulukon 1 perusteella, että kyseessä on lähempänä eloperäistä maalajia oleva kerros kuin savea.

Taulukko 1. Maalajien kaivuuluokitus (Hartikainen 2000, 16.)

Maalajiryhmä	Kaivu-luokka	Maalaji	painokai- rausvas- tus	heijarikai- rausvastus lyöntiä/m	seisminen no- peus pohjave- den yläpuolelle V ,m/s	Seisminen nopeus pohjaveden pinnana yläpuolella V, m/s
E	E1	liejut, muta	< 50 kg			
	E2	turpeet	< 50 kg			
	E3	turpeet	< 50 kg			
H	H1	savet	<100kg			1100...1500
	H2	siltit	< 150 pk/m			1100...1500
	H3	kuivakuoret	>10 pk/m		<300	
K	K1	hiekat	>50 pk/m	>50	200...500	1200...1600
	K2	sorat	>50 pk/m	>50	400...800	1500...1800
	K3	somerot	-	>50	500...1100	1600...1900
M	M1	kivikot Löyhät, kivettömät tai	-			
	M2	kiviset moreenit keskitiiviit, kivet- tömät	-	<300	700...1000	1600...1900
	M3	tai kiviset moree- nit	-	300...700	800...1400	1800...2000
		runskiviset	-	700	1200...1600	2000...2300
		runskareiset ja lohkareiset mo- reenit	-	>400	1200...1600	2000...2300
		louhikot	-	-	1200...1600	2000...2300

Turvekerroksen alla maalaji muuttuu siltiksi. Kymmenessä metrissä on vastaan tullut moreenikerros, johon kairaa on upotettu lyömällä. Merkinnän mukaan kyseessä olisi silttinen moreeni. Kairan painuminen pohjakerrokseen on päättynyt kiveen tai lohkareeseen, josta kertovat kolmion muotoiset merkinnät kairausdiagrammin alapäässä.

2.7 Lujuusarvojen määrittäminen kairaustuloksista

Alustaluvun määrittästä varten tarvitaan tieto eri maalajien suljetusta leikkauslujuudesta (merkitään s_u tai c_u), joka on maan parametri, jolla on yleisesti ottaen erittäin suuri merkitys maan kantavuudelle ja maarakenteiden vakavuudelle. Maan leikkauslujuus muodostuu kahdesta päätekijästä: sisäisestä kitkasta ja/tai koheesiosta. Sisäinen kitka aiheutuu ”normaalin” kitkan tavoin maarakkeiden välisestä hankauksesta. Koheesio puolestaan aiheutuu kiinnevoimista, jotka vaikuttavat maahiukkasten välillä, sekä sähköstaattisista voimista, jotka vaikuttavat mineraalihiukkasten ja niitä ympäröivien vesivaippojen välillä. Leikkauslujuuden suuruuteen vaikuttavat lisäksi maakerrokseen kohdistuvan kuormituksen nopeus sekä maan vesipitoisuus ja vedenläpäisevyys. (Rantamäki, Jääskeläinen & Tammirinne 1979, 123, 124 ja Koivula 2016, 17.)

Maan leikkauslujuus voidaan määrittää siipikairauksella tai haluttaessa tarkempi määrittäminen otetaan häiriintymätön maanäyte laboratorioissa suoritettava kolmiakσιαalikoetta varten. Näitä kumpaakaan menetelmää ei käsitellä tässä tämän tarkemmin. Esimerkiksi kirjassa Geotekniikan perusteet vuodelta 2009 on molemmat menetelmät kuvattu yksityiskohtaisesti. (Jääskeläinen 2009a, 107, 112)

Tarkoitus oli määrittää painokairauksen yhteydessä myös suljettu leikkauslujuus koekuormitusalueelta siipikairauksella. Väärinkäsityksestä johtuen käytettävissä ei ollutkaan siipikairauslaitteistoa, joten tämä jäi tekemättä, eikä sitä myös katsottu tarpeelliseksi tehdä jälkikäteen kustannussyistä. Suljettu leikkauslujuus koekuormitusalueen maalajeille määritettiin hyödyntämällä painokairaustietoja sekä kirjallisuudesta löytyviä tyypillisiä arvoja eri maalajeille.

Koska turvemaalajeille ei voida määrittää luotettavia lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia johtuen siinä kesken olevasta maatumisreaktiosta, arvioidaan sen suljettua leikkauslujuutta alla olevan taulukon 2 avulla. Vertailulaskelmissa käytetään suljetun leikkauslujuuden arvona alle 10 kN/m² olevia arvoja.

Taulukko 2. Hienorakeisten maakerrosten kuvaus lujuuden perusteella (Korhonen, Gardemeister; & Tammirinne, 1974, 17.).

Nimitys	Suljettu leikkauslujuus s_u , kN/m ² *)
hyvin pehmeä	≤ 10
pehmeä	> 10... 25
sitkeä	> 25... 50
kova	> 50...100
hyvin kova	> 100

Silttikerroksen suljetulle leikkauslujuudelle voidaan laskea arvo kaavalla 1 (Rantamäki, Jääskeläinen & Tammirinne 1979, 124.)

$$c_u = c' + \sigma' \times \tan \varphi' \quad (1)$$

missä c' = tehokas koheesio [kN/m²]
 σ' = tehokas normaalijännitys tarkastelusyvyydellä [kN/m²]
 φ' = tehokas kitkakulma [°]

Tehokas normaalijännitys saadaan laskemalla pohjaltaan 1 m x 1 m -kokoi-
 sen maapatsaan aiheuttama jännitys tarkastelusyvyydellä. Tähän tarvitaan
 tieto maalajikerrosten tehokkaasta tilavuuspainosta. Koska maalajinäytteitä
 ei otettu, käytetään tilavuuspainon ja kitkakulman määrittelyssä apuna tau-
 lukkoa 3 olettamalla silttikerros karkeaksi.

Tässä työssä tarvittava tieto maaperästä on lujuusarvojen lisäksi pohjave-
 denpinnan korkeus, joka voitiin todeta paalujen asentamisen jälkeen paalun
 sisäpuolelle nousseesta vedestä. Tässä kohteessa se oli maanpinnan tasossa.

Taulukko 3. Karkean siltin ja hiekan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien arviointi
 puristin-, paino- ja heijarikairausvastuksen perusteella. (Nummelin & Tolla
 2017, Liite 6/ 1(2).)

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m ³) pohja- vedenpinnan		Kitkakul- ma (°)	Janbun yhtälön muodonmuutos- parametri		Kairausvastus		
		Yläpuo- lella	Alapu- o-lella		Moduuli- luku m	Jännitys- ekspo- nenti β	Puristin- kairaus q _c (MPa)	Paino- kairaus Pk/0,2 m	Heijari- kairaus L/0,2 m
Karkea siltti	Löyhä	14 ... 16	9 ...	28	30 ... 100	0,3	< 7	< 40	< 8
	Keski- tiivis			30	70 ... 150	0,3	7 ... 15	40 ... 100	8 ... 25
	Tiivis	16 ... 18	11	32	100 ... 300	0,3	> 15	> 100	> 25
Hieno hiekkä d ₁₀ <0,06	Löyhä	15 ... 17	9 ...	30	50 ... 150	0,5	< 10	20 ... 50	5 ... 15
	Keski- tiivis			33	100 ... 200	0,5	10 ... 20	50 ... 100	15 ... 30
	Tiivis	16 ... 18	11	36	150 ... 300	0,5	> 20	> 100	> 30
Hiekkä d ₁₀ >0,06	Löyhä	16 ... 18	10 ...	32	150 ... 300	0,5	< 6	10 ... 30	5 ... 12
	Keski- tiivis			35	200 ... 400	0,5	6 ... 14	30 ... 60	12 ... 25
	Tiivis	18 ... 20	12	38	300 ... 600	0,5	> 14	> 60	> 25

Taulukosta 3 saadaan silttikerroksen tilavuuspainoksi 9 kN/m³ ja kitkakul-
 maksi 28°. Koheesio c on nolla kitkamaalajeilla. Arvioidaan turvekerroksen
 tilavuuspainoksi 5 kN/m³, jolloin saadaan neljän metrin syvyydessä tehok-
 kaaksi normaalijännitykseksi laskemalla kaavalla 2

$$\sigma' = Z_1 \times \gamma_1 + Z_2 \times \gamma_2 \quad (2)$$

missä $Z_{1,2}$ = maalajikerroksen vahvuus [m]
 $\gamma_{1,2}$ = tilavuuspaino tarkastelusyvyydellä [kN/m³]

Sijoittamalla kaavaan 2 saadaan

$$\sigma' = 2m \times 5 \frac{kN}{m^3} + 2m \times 9 \frac{kN}{m^3} = 28 \frac{kN}{m^2} \quad (2)$$

Sijoittamalla nyt kaavan 1 saadaan suljetuksi leikkauslujuudeksi pyöristettynä

$$c_u = 0 + 28 \frac{kN}{m^2} \times \tan 28^\circ \approx 15 \frac{kN}{m^2} \quad (1)$$

Kaavoissa 2 ja 3 ei maalajien arvoissa huomioitu varmuuskertoimia, koska tässä opinnäytetyössä vertaillaan laskettuja ja mitattuja vaakasiirtymän arvoja.

3 PAALUN MITOITUS JA LASKENTAMENETELMÄT

Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä paaluperustuksen mitoitusta yksityiskohdaisemmin vaan pääkohdittain, jotta lukijalle muodostuu riittävä kuva paaluperustuksen mitoituksesta. Aiheesta löytyy oppikirjallisuutta sekä paljon ansiokkaasti kirjoitettuja opinnäytetöitä, joissa mitoitusta on käsitelty laajasti ja perustellisesti.

3.1 Sivukuormitetun paaluperustuksen mitoitus

Infrarakentamisen kohteissa sivukuormitetun paaluperustuksen mitoitus tehdään soveltuvien osin vuonna 2017 valmistuneen Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohjeen Geotekninen suunnittelu – NCCI7:n (Liikenneviraston ohjeita 13/2017) sekä ohjeen RIL 254–2016: Paalutusohje 2016 mukaisesti. Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohjeessa (Sivukuormitettujen pylväasperustusten suunnitteluohje. Liikenneviraston ohjeita 32/2016, LIVI/7462/06.04.01/2016) esitetään näistä ohjeista poikkeavat tai niitä täsmentävät ohjeet.

Lyömällä asennettavien paaluperustuksen käyttäminen pylväasperustuksina vaatii riittävän tiedon vallitsevista pohjaolosuhteista. Paalun lyöntisyvydellä on merkittävä vaikutus paalun sivukuormituskestävyyteen, joten riittävän lyöntisyvyuden saavuttaminen on varmistettava pohjatutkimuksilla. Tämä lyöntisyvyuden vaikutus todettiin myös tämän työn kokeiden mittaus tuloksissa.

3.1.1 Murtorajatilamitoitus (geotekninen suunnittelu)

Murtorajatilatarkastelussa täytyy osoittaa, että kuormien tai kuorman vaikutusten mitoitusarvo (Ed) on pienempi tai yhtä suuri kuin kestävyysmitoitusarvo (Rd). Murtorajatilamitoitus tehdään NCCI7:n mukaan STR/GEO-rajatilassa käyttäen menetelmää DA2*. Menetelmässä DA2*-mitoitus tehdään ominaisarvoilla ja vasta mitoituksen lopussa käytetään osavarmuuslukuja murtorajatilaehtoa tarkastettaessa (Kulmala 2013, 54).

Kuormat ja kuormien osavarmuudet määritetään perustettavasta rakenteesta riippuen luvun 3 mukaisesti. Maan kestävyys osavarmuusluku $\gamma_{Re} = 1,5$. Sivukuormituskestävyyden lisäksi paaluperustuksille pitää tarkastaa paalun kantokestävyys ja tehdä myös muut NCCI7:ssä vaaditut kestävyystarkastelut.

Geoteknisen mitoituksen lisäksi paalulle täytyy tehdä myös tarpeelliset rakenteelliset tarkastelut, kuten muun muassa taivutus- ja nurjahduskestävyys. Näihin ei puututa tässä enempää muuta kuin viitataan esimerkiksi Ilkka Isokankaan vuonna 2015 valmistuneeseen opinnäytetyöhön, jossa on tutkittu kärjellä kantavan paalun nurjahdustarkastelua.

3.1.2 Käyttörajatilamitoitus

Sivukuormitetuilla rakenteilla mitoittavaksi tekijäksi rakenteellisen tai geoteknisen kestävyys lisäksi voi muodostua sallittu siirtymä vaakasuunnassa. Mitoitus tapahtuu siten, että kuormat otetaan laskennassa huomioon todellisina, toisin sanoen niitä ei kerrota osavarmuuskertoimilla kuten tehdään murtorajatilamitoituksessa.

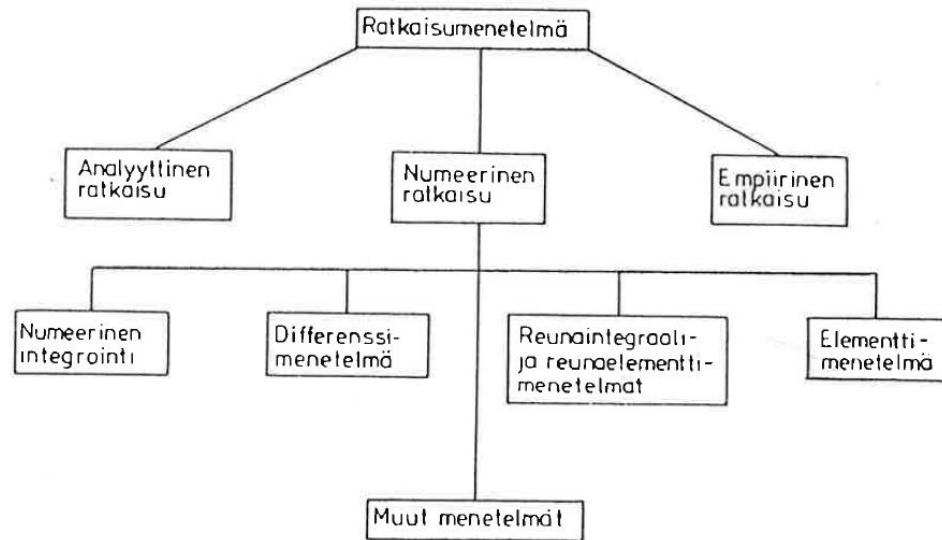
Paalua ympäröi aina maaperä, jonka materiaaliominaisuuksien arviointi perustuu käytettävissä oleviin maaperätutkimustuloksiin, joiden tuloksissa on vaihtelua, vaikka maaperäkerrokset olisivat homogeenisiakin. Laskelmiin otetaan maaperän ominaisarvot ”varovaisina keskiarvoina” (Jääskeläinen 2009b, s. 39.) ja vielä todennäköisesti painottaen heikoimpia mittaustuloksia. Tästä syystä johtuen vaakasiirtymän arvioinnissa laskennallisesti on mukana myös jonkin verran varmuutta.

Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä murtoraja- tai käyttörajatilataarkasteluja tämän tarkemmin, koska työssä vertaillaan vaakasuunnassa kokeellisesti kuormitun paalun vaakasuuntaisten siirtymien ja laskennallisten siirtymien tuloksia.

3.2 Geotekniikassa käytettävät laskentamenetelmät

Paalun sivukapasiteetti voidaan määrittää kuormituskokeiden tai laskennallisesti pohjatutkimustulosten ja paalun lujuuden perusteella. Sivukapasiteetin määrittämisessä voidaan käyttää joko analyyttisiä, numeerisia tai empiirisiä menetelmiä, joiden jaottelu on esitetty kuvassa 13. Pääasialliset erot eri laskentamallien välillä löytyvät maan ja paalun mallintamisen osalta.

Analyyttisissä menetelmissä maan käyttäytymistä mallinnetaan yksinkertaisilla menetelmillä, kuten alustalukumenetelmään perustuvilla menetelmillä. Analyyttiset menetelmät soveltuvat käytettäväksi alustavassa paalun sivukapasiteetin arvioinnissa käsinlaskentamenetelmänä, kun sivukuormitus on staattinen ja kuormitusyhdistelmä riittävän yksinkertainen. (Rasi-Koskinen 2014, 35.)



Kuva 13. Ratkaisumenetelmien jaottelu. (Nirhamo 1995, 52.)

Tässä opinnäytetyössä on tehty vertailulaskelmia käyttämällä analyyttistä menetelmää, lineaarista numeerista menetelmää ja paalujen mitoittamiseen kehitettyä laskentaohjelmistoa.

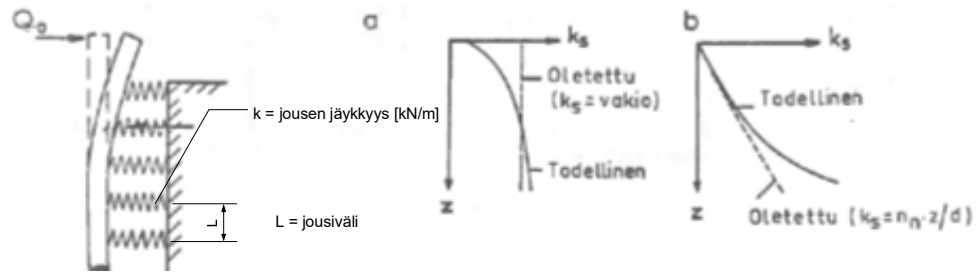
3.3 Alustalukumenetelmä

Winklerin menetelmä eli alustalukumalli on ollut suosittu malli sivukuorimitettujen paalujen analysoinnissa sen yksinkertaisuuden ja kohtalaisen tarkkuuden vuoksi. Sivuvastuksen tai -kuorituksen sekä rakenteen siirtymän riippuvuutta toisistaan voidaan useimmiten kuvata alustaluvuilla. Alustalukumenetelmässä paalua ympäröivä maaperä korvataan yksittäisten kimmoisten jousien muodostamalla jousisarjalla, missä jousien jäykkyyksiä kuvataan alustaluvuilla. (Rasi-Koskinen 2014, 41.)

Kuvassa 14 on esitetty vasemmalla maaperän korvaaminen jousilla ja oikealla puolella todellinen alustaluku sekä Winklerin menetelmän alustaluku k_s syvyyden z funktiona. (Rasi-Koskinen 2014, 42.) Alustaluku k_s määritetään kaavalla 3.

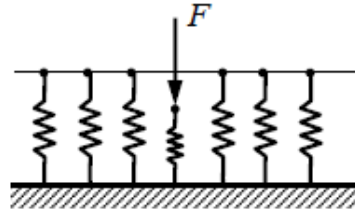
$$k_s = \frac{p_m}{z} \quad (3)$$

missä p_m = jouseen kohdistuva maanpaine [kN/m²]
 z = etäisyys maanpinnasta [m]
 k_s = maan alustaluku [kN/m²]



Kuva 14. Vasemmalla Winklerin alustalukumalli ja oikealla alustaluvun jakautuminen a) koheesiomaassa ja b) kitkamaassa syvyyden z funktiona. (Rasi-Koskinen 2014, 41)

Kuva 15 havainnollistaa pistekuorman F vaikutusta Winklerin alustaan. Vain voiman F vaikutuspisteessä oleva jousi puristuu kokoon, kun todellisuudessa maassa on sidoksia viereisten partikkeleiden välillä. Tästä mallista onkin olemassa kehittyneempiä malleja, joilla voidaan kuvata todellista käyttäytymistä tarkemmin, mutta silloin myös ratkaisu monimutkaistuu.



Kuva 15. Winklerin alustan malli ja pistekuorman vaikutus siihen. (Aalto 2018, 220.)

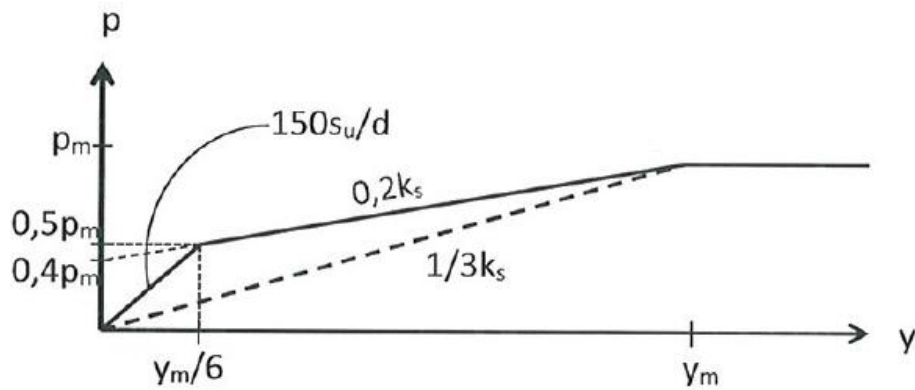
Alustalukumenetelmää käytettäessä rakennemallin jousivälin tulee olla riittävän tiheä, jotta laskenta-analyysiin saadaan riittävä tarkkuus. Alustalukumenetelmään perustuva mitoitus suositellaan kuitenkin tehtäväksi laskenta-ohjelmalla, jolla voidaan mallintaa jousen kimmoisen alueen epälineaarinen käyttäytyminen. Tällöin laskenta saadaan tehtyä yhdellä laskentakierroksella. (Nummelin & Tolla 2016, 34.)

RIL:in julkaisemassa ”Paalutusohje 2016” -teoksessa (Riihimäki 2016, 100.) kuvataan hienorakeisessa maassa alustaluvun määrittäminen lyhytaikaisessa kuormituksessa (vaativissa olosuhteissa) kaavalla 4

$$k_s = 50 \dots 150 \times \frac{c_u}{d} \quad (4)$$

missä c_u = suljettu leikkauslujuus [kN/m^2]
 d = paalun halkaisija [m]
 k_s = alustaluku [kN/m^3]

Suljetun leikkauslujuuden määrittäminen koekuormituskohteessa esitettiin aikaisemmin kohdassa 2.7. Kuvassa 16 on esitetty, miten alustaluku muuttuu siirtymän kasvaessa, kunnes kuormitus on saavuttanut maan murtolujuuden p_m . Kuvassa katkoviivalla on merkitty alustaluvun arvo, jota voidaan käyttää käsinlaskennassa maan murtoarvon ja maksimi siirtymän määrittämisessä ennen kuin maa lopullisesti murtuu.



Kuva 16. Paalun sivupaine-siirtymäyhteys hienorakeisessa maassa. (Riihimäki 2016, 97.)

Laskentamallien jousien jäykkyys k saadaan kertomalla alustaluku k_s jousien etäisyydellä L ja paalun halkaisijalla d eli

$$k = k_s \times L \times d \quad (5)$$

Winklerin mallissa oletetaan, että maan sivupaine on suoraan verrannollinen paalun siirtymään eli

$$p_m = k_s \times v \quad (6)$$

missä v = jousen puristuma [m]
 k_s = alustaluku [kN/m^3]
 p_m = sivupaine [kN/m^2]

Paalulle on voimassa lineaarisen ja teknisen taivutusteorian mukainen taivutusmomentin ja taipuman välinen yhteys

$$M = EI \times v'' \quad (7)$$

Analyttisen ratkaisun johtamista kaavojen 6 ja 7 yhdistämiseksi ei tässä yhteydessä esitetä, vaan tyydytään viittaamaan esimerkiksi Jukka Aallon luentomateriaalin (Aalto 2018, 218–232), jossa on esitetty kimmoisella alustalla olevan palkin yhtälöiden teoreettinen johtaminen.

Kirjassa Roark's formulas for stress and strain on esitetty valmiit kaavat eri kuormituksille ja kiinnitystapauksille. Liitteessä 4 on laskettu kirjan taulukon 8.5 kohdan 1 (ks. kuva 17) mukaisen tapauksen mukaan paalun taivutusmomentti, yläpään siirtymä ja sivupaine siirtymän avulla. (Young & Budynas 2002, 213.)

TABLE 8.5 Shear, moment, slope, and deflection formulas for finite-length beams on elastic foundations

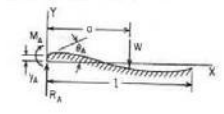
NOTATION: W = load (force); w = unit load (force per unit length); M_0 = applied couple (force-length); θ_0 = externally created concentrated angular displacement (radians); Δ_0 = externally created concentrated lateral displacement (length); γ = temperature coefficient of expansion (unit strain per degree); T_1 and T_2 = temperatures on top and bottom surfaces, respectively (degrees). R_L and R_R are the vertical reactions at the left and right, respectively, and are positive upward. M_L and M_R are the reaction end moments at the left and right, respectively, and all moments are positive when producing compression on the upper portion of the beam cross section. The transverse shear force V is positive when acting upward on the left end of a portion of the beam. All applied loads, couples, and displacements are positive as shown. All slopes are in radians, and all temperatures are in degrees. All deflections are positive upward and slopes positive when up and to the right. Note that M_L and R_L are reactions, not applied loads. They exist only when necessary end restraints are provided.

The following constants and functions, involving both beam constants and foundation constants, are hereby defined in order to permit condensing the tabulated formulas which follow

$$k_s = \text{foundation modulus (unit stress per unit deflection)}; b_s = \text{beam width}; \text{ and } \beta = (b_s k_s / 4EI)^{1/4}. \text{ (Note: See page 131 for a definition of } (x-a)^n \text{.) The functions: } \cosh \beta(x-a), \sinh \beta(x-a), \cos \beta(x-a), \text{ and } \sin \beta(x-a) \text{ are also defined as having a value of zero if } x < a.$$

$F_1 = \cosh \beta x \cos \beta x$ $F_2 = \cosh \beta x \sin \beta x + \sinh \beta x \cos \beta x$ $F_3 = \sinh \beta x \sin \beta x$ $F_4 = \cosh \beta x \sin \beta x - \sinh \beta x \cos \beta x$ $F_5 = (x-a)^3 \cosh \beta(x-a) \cos \beta(x-a)$ $F_6 = \cosh \beta(x-a) \sin \beta(x-a) + \sinh \beta(x-a) \cos \beta(x-a)$ $F_7 = \sinh \beta(x-a) \sin \beta(x-a)$ $F_8 = \cosh \beta(x-a) \sin \beta(x-a) - \sinh \beta(x-a) \cos \beta(x-a)$ $F_9 = (x-a)^3 \cos \beta(x-a)$ $F_{10} = 2\beta(x-a)^2 \cos \beta(x-a) - F_9$	$C_1 = \cosh \beta l \cos \beta l$ $C_2 = \cosh \beta l \sin \beta l + \sinh \beta l \cos \beta l$ $C_3 = \sinh \beta l \sin \beta l$ $C_4 = \cosh \beta l \sin \beta l - \sinh \beta l \cos \beta l$ $C_5 = \cosh \beta(l-a) \cos \beta(l-a)$ $C_6 = \cosh \beta(l-a) \sin \beta(l-a) + \sinh \beta(l-a) \cos \beta(l-a)$ $C_7 = \sinh \beta(l-a) \sin \beta(l-a)$ $C_8 = \cosh \beta(l-a) \sin \beta(l-a) - \sinh \beta(l-a) \cos \beta(l-a)$ $C_9 = 1 - C_5$ $C_{10} = 2\beta(l-a)^2 - C_9$	$C_{11} = \sinh^2 \beta l - \sin^2 \beta l$ $C_{12} = \cosh \beta l \sinh \beta l + \cos \beta l \sin \beta l$ $C_{13} = \cosh \beta l \sinh \beta l - \cos \beta l \sin \beta l$ $C_{14} = \sinh^2 \beta l + \sin^2 \beta l$
---	---	--

1. Concentrated intermediate load



Transverse shear $V = R_L F_1 - \gamma_1 2EI\beta^3 F_2 - \theta_0 2EI\beta^3 F_3 - M_L F_4 - W F_5$

Bending moment $M = M_L F_1 + \frac{R_L}{2\beta} F_2 - \gamma_1 2EI\beta^3 F_3 - \theta_0 EI F_4 - \frac{W}{2\beta} F_5$

Slope $\theta = \theta_0 F_1 + \frac{M_L}{2EI\beta} F_2 + \frac{R_L}{2EI\beta^2} F_3 - \gamma_1 \beta F_4 - \frac{W}{2EI\beta^2} F_5$

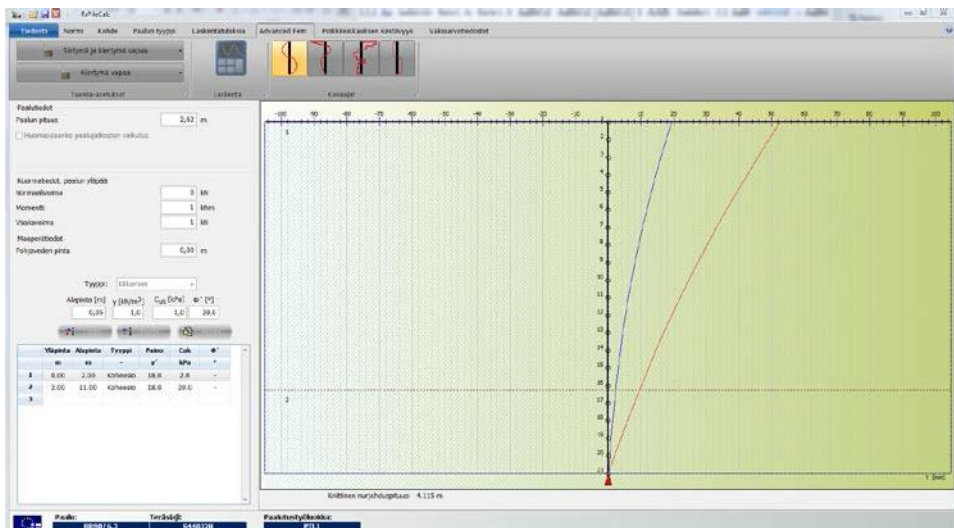
Deflection $y = y_A F_1 + \frac{\theta_0}{2\beta} F_2 + \frac{M_L}{2EI\beta^2} F_3 + \frac{R_L}{4EI\beta^3} F_4 - \frac{W}{4EI\beta^3} F_5$

If $\beta l > 6$, see Table 8.6
Expressions for R_L, M_L, R_R , and y_A are found below for several combinations of end restraints

Kuva 17. Kimmoisalla alustavalla olevan pistevoiman kuormittaman palkin ratkaisuyhtälöt taipumalle, taivutusmomentille, kiertymälle ja leikkausvoimalle (Young & Budynas 2002, 213).

3.4 Teräspaalun mitoitusohjelma RRPileCalc

SSAB Europe Oy on kehittänyt omille lyömällä ja poraamalla asennettaville paaluilleen mitoitusohjelman nimeltään RRPileCalc, joka mitoittaa heidän valmistamiensa teräspaalujen geoteknisen ja rakenteellisen kestävyuden annetuissa pohjaolosuhteissa. Alla olevassa kuvassa (kuva 18) on kuvakaappaus ohjelman käyttöliittymästä.



Kuva 18. Kuvakaappaus mitoitusohjelman RRPileCalc ja sen lisäosan Advanced FEM käyttöliittymästä.

Ohjelma soveltaa laskennassa eurokoodeja sekä maakohtaisia kansallisia ohjeita ja määräyksiä. Ohjelma sisältää kaikki SSAB:n paalukoot ja teräsputkipaalut, jotka voidaan mitoittaa tyhjänä teräsputkipaaluna, betonilla täytettynä teräsputkipaaluna ilman liittovaikutusta, teräsbetonisena liittorakennepaaluna tai sydänteräspaaluina. RRPileCalc:lla pystytään laskemaan

paalun rakenteellinen kestävyys sekä paalun geotekninen kestävyys. Paalut voidaan mitoittaa Suomen, Ruotsin ja Norjan kansallisten ohjeiden mukaisesti. (Isokangas 2015, 43).

Ohjelmassa on lisätoiminto, Advanced FEM, jonka avulla voidaan toisen kertaluvun teorian mukaiset vaikutukset ottaa huomioon laskennassa. Ohjelma mallintaa paalun ympärillä olevan maan epälineaarisilla jousilla alus-
talukumenetelmän mukaan. Jousien määrään tai niiden etäisyyteen ei käyttäjä voi vaikuttaa.

Ohjelman tässä lisäosiossa annetaan muun muassa laskentaa varten seuraavat tiedot:

- paalun pituus
- paalun normaalivoima
- paalun yläpään momentti
- paalun vaakavoima
- maaperän tiedot kuten
 - pohjaveden pinnantas
 - kitka- tai koheesiomaa
 - tilavuuspaino
 - suljettu leikkauslujuus
 - kitkakulma.

Ohjelmassa maaperä voidaan mallintaa kerroksittain ja joka kerrokselle voidaan antaa omat maaperätiedot. Lisäksi paalun ylä- ja alapään siirtymävaapausteet voidaan määrittää tapauskohtaisesti.

3.5 Empiiriset koekuormitukseen perustuvat menetelmät

Paalun geotekninen käyttäytyminen voidaan mitoittaa Suomessa myös kokemuseräiseen tietoon perustuen, jonka paikkansapitävyys on osoitettu staattisilla tai dynaamisilla koekuormituksilla vastaavissa olosuhteissa. Ku-
vassa 19 on esimerkkejä kuormituskokeista.

Koekuormituksia tulee tehdä muun muassa seuraavissa tilanteissa:

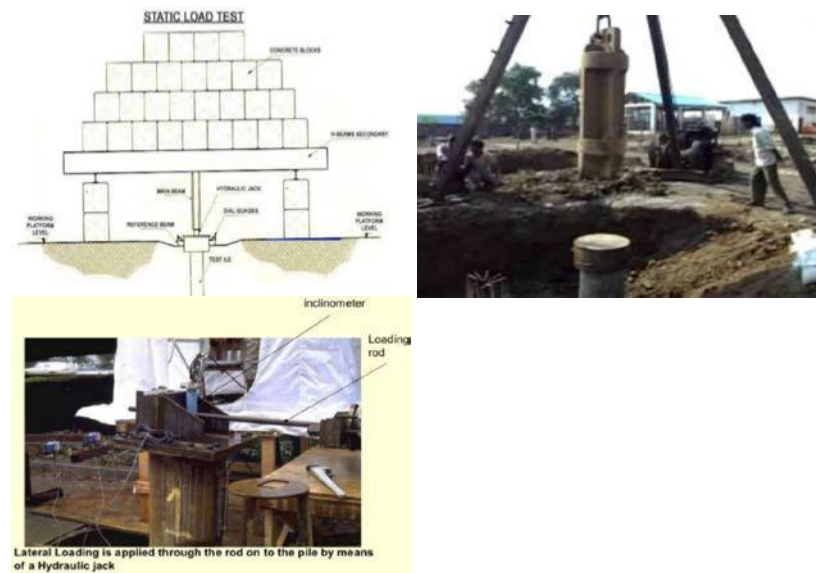
- käytettäessä paalutyyppiä tai asennusmenetelmää, josta ei ole vertailukelpoista kokemusta
- kun paaluja ei ole aikaisemmin koekuormitettu vastaavissa pohja- ja kuormitusolosuhteissa
- kun paaluihin kohdistuu kuormitus, josta teoria ja kokemus eivät anna riittävää varmuutta mitoituksiin. Paalun koekuormitusmenetelmässä käytettävän kuormituksen tulee luonteeltaan vastata ennakoitua kuormitusta
- kun paalujen asennuksen aikana tehdyt havainnot osoittavat paalujen käyttäytymisen poikkeavan merkittävästi ja epäedullisella tavalla pohjatutkimusten tai kokemusten perusteella oletetusta käyttäytymisestä ja kun lisäpohjatutkimukset eivät selitä poikkeaman syytä. (RIL 2011, 54.)

Koekuormituksilla voidaan arvioida valitun rakentamismenetelmän sopivuutta kohteeseen ja varmistaa paalun ja maaperän käyttäytyminen kuormituksen alaisena; lisäksi niitä voidaan käyttää antamaan tietoa koko perustuksen toiminnan arviointia varten. (RIL 2011, 54.)

Koekuormitusta suunniteltaessa tulee seuraavat asiat huomioida:

- Jos koekuormituksia tehdään kahdelle tai useammalle paalulle, koekuormituskohtien tulisi edustaa paaluperustuksen rakennuspaikkaa ja yksi koepaaluista tulisi sijoittaa kohtaan, jossa epäedullisimpien pohjaolosuhteiden uskotaan esiintyvän.
- Koepaaluun asennuksen ja koekuormituksen aloituksen välillä tulisi olla riittävä aika, jotta voidaan varmistua, että paalumateriaalin vaadittu lujuus on saavutettu ja huokosvedenpaineet ovat palautuneet alkuperäisiin arvoihinsa.
- Joissakin tapauksissa voi olla tarpeen merkitä muistiin paalun asennuksen aiheuttamat huokosvedenpaineet ja niiden poistuminen, jotta osataan valita sopiva aloittamisajankohta koekuormitukselle. (RIL 2011, 54.)

Koekuormitusta suunniteltaessa tulisi myös huomioida kuormitusportaiden määrää, kestoja ja kuormitusrytmiä. Näin voidaan tehtyjen mittausten perusteella tehdä johtopäätöksiä paaluperustuksen muodonmuutuskäyttäytymisestä, virumasta ja palautumisesta. Jos on tarkoitus samalla selvittää esimerkiksi aikaisemmin tuntemattoman paalutyypin ominaisuuksia, tulee kuormituksen olla sellainen, että myös paalun murtokuormasta voidaan tehdä tarvittavia johtopäätöksiä. (RIL 2011, 55.)



Kuva 19. Kuvissa esimerkkejä paalun staattisesta vaakakuormituskokeesta sekä aksiaaliseen staattiseen ja dynaamiseen koekuormituksesta (Paliwal 2016, 19, 20 ja 21).

4 PAALUN KOEKUORMITUS VAAKASUUNNASSA

4.1 Taustaa paalun koe kuormitukselle

Suomessa on tehty aikaisemmin kaksi erillistä koetta, joissa paaluja on koe kuormitettu vaakasuuntaisella voimalla. Ensimmäinen koe on tehty Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa hienolla hiekalla täytetyssä koe kuopassa vuonna 1990 liseniaattityön yhteydessä. Toinen koe tehtiin Hämeenlinnan kohdalla olevan valtatie (vt3) meluesteseinän siltiin lyömällä asennetulle paaluperustukselle vuonna 1995 diplomityön yhteydessä. Näiden kokeiden tuloksia on muun muassa Hanna Rasi-Koskinen analysoinut tarkemmin vuonna 2014 valmistuneessa diplomityössään.

Näissä molemmissa kokeissa paaluina ovat olleet pyöreät teräsputkipaalut, joiden mitatut siirtymät ovat olleet alle 20 mm vuoden 1995 kokeissa maanpinnan tasossa 25 kN:n kuormituksella ja noin 115 mm 50 kN:n kuormalla vuonna 1990 koe kuopassa suoritetuissa kokeissa. Vuonna 1995 tehdyissä kokeissa koepaalut upotettiin pohjaveden yläpuolella olevaan silttikerokseen, jonka päällä oli rakennettu pengeri hiekasta ja murskesorasta. Voidaan siis todeta, että paalun yläpää on tukeutunut hyvän sivuvastuksen tarjoamaan kerrokseen molemmissa kokeissa.

Ajatus kokeiden suorittamisesta lähti liikkeelle osittain myös siitä, miten paljon aksiaalisesti kuormitetun paalun nurjahdustarkastelussa pehmeä maakerros antaa sivuttaistukea. Samanaikaisesti oli tekeillä insinöörityö (Isokangas 2015), jossa tutkittiin lyötävien teräsputkipaalujen nurjahdustarkasteluita Suomen, Ruotsin ja Saksan ohjeiden mukaan. Työssä otettiin kantaa alustalukujen vaikutuksesta nurjahdustarkasteluihin. Työssä todettiin, että eri maiden käyttämien menetelmiä ei voi verrata keskenään, koska niissä käytettävät mitoitusarvot eivät perustu koe kuormituksiin.

4.2 Koe kuormituksen suunnittelu

Koepaikaksi löydettiin Hämeenlinnasta Vanajaveden entistä järvenpohjaa, jossa painokairausten mukaan on noin kaksi metriä pehmeää kerrosta ennen kantavampaa kerrosta. Painokairausten tulokset on esitetty liitteessä 1. Nii den tulkintaa käytiin läpi kohdassa 2.6.

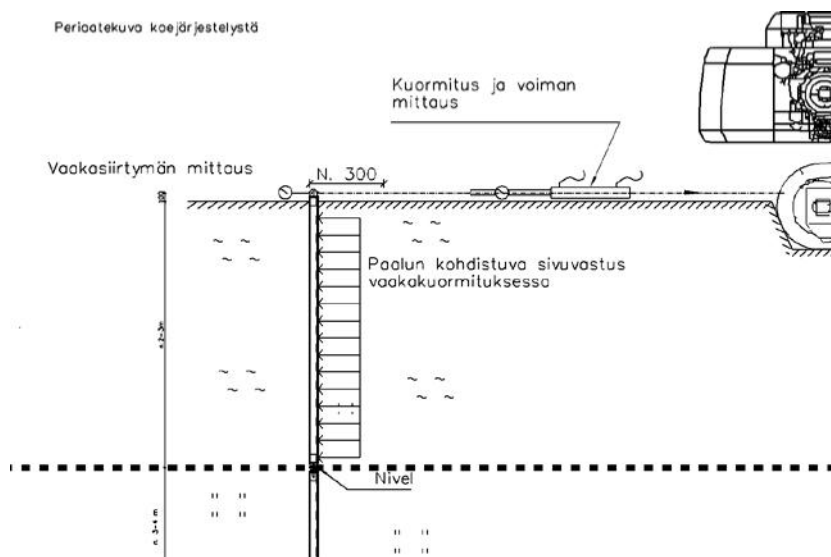
Koska paalun nurjauttaminen käytännössä tulisi hankalaksi ja kustannuksiltaan melko kalliiksi, päätettiin tehdä kuormitus vaakakuormituksena paalun yläpäälle. Maa ei tiedä, liikkuuko paalu sivuttais aksiaali- vai vaakakuormituksesta. Koetta varten kehitettiin koepaalu, joka ei koe kuormitettaessa kannu kuormaa sivusuunnassa, vaan kaikki vastus, joka kuormituksessa syntyy, tulee maan antamasta vastuksesta. Paaluun suunniteltiin nivel, joka mahdollistaa paalun kiertymisen, jolloin voidaan varmuudella tietää lyhyen paalun kiertokeskiön etäisyys kuormituspisteestä. Koepaalun muut ominaisuudet olivat

- ulkohalkaisija $d = 89,9 \text{ mm}$
- seinämävahvuus $t = 6,3 \text{ mm}$

- pituus $L = 6 \text{ m}$
- taivutusjäykkyys $EI = 295 \text{ kN/m}^2$
- taivutusvastus, myötö $W_{el} = 31,6 \text{ cm}^3$. (SSAB Europe Oy 2018, 12).

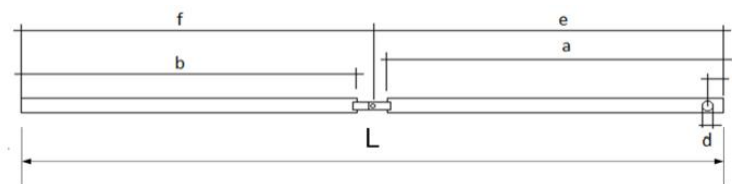
Lujuusominaisuuksissa ei ole huomioitu korroosiovaraa, joka normaalissa mitoituksessa tulee paalutusohjeen (RIL 2011, s. 114.) mukaan ottaa huomioon.

Kuvassa 20 on esitetty periaatekuva kuormitus- ja mittausjärjestelyistä. Liitteessä 2 on koetta varten suunnitellun koepaalin valmistuskuva ja mitoituslaskelmat.



Kuva 20. Periaatekuva koeuormituksen käytännön toteuttamisesta.

Nivellisiä koepaaluja valmistettiin kuusi kappaletta, joissa kolmessa nivel oli sijoitettu kahden metrin etäisyydelle yläpäästä ja kolmessa kolmen metrin etäisyydelle. Lisäksi otettiin koeuormituksiin mukaan vielä kolme täysimittaista paalua ($L = 6 \text{ m}$) mukaan. Paalujen mitat on esitetty kuvassa 21.



	Paalu	mm					
		a	b	c	d	e	f
Kaksiosainen paalu	A I	2904	2967	49	32	2955	3016
Kaksiosainen paalu	A II	2902	2962	46	32	2953	3017
Kaksiosainen paalu	A III	2905	2965	49	31	2955	3012
Kaksiosainen paalu	B I	1905	3964	45	31	1954	4014
Kaksiosainen paalu	B II	1904	3962	45	31	1954	4013
Kaksiosainen paalu	B III	1904	3965	46	32	1954	4016
Täysimittainen paalu	C I	6026	-	43	31	-	-
Täysimittainen paalu	C II	6027	-	44	31	-	-
Täysimittainen paalu	C III	6027	-	46	31	-	-

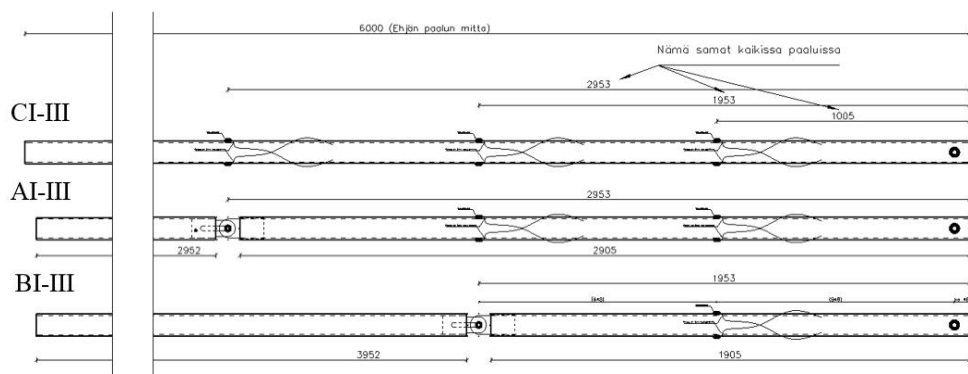
Kuva 21. Koepaalujen mitat ja merkinnät.

Kaikkiin paaluihin asennettiin vielä venymäliuskat, joiden avulla voidaan mitata paalussa tapahtuvia muodonmuutoksia. Venymäliuska on materiaalin pintaan yleisemmin liimalla asennettava anturi, joka on valmistettu sähköjohtavasta materiaalista, jossa tutkittavan pinnan venyminen tai supistuminen saa aikaan resistanssin muutoksen. Tämä muutos voidaan mitata ja muuntaa venymäksi, josta taas saadaan jännitys kaavalla 8

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (8)$$

missä $E = 210\,000\text{ MPa}$, teräksen kimmomoduuli
 ε = venymä, dimensioton suure
 σ = jännitys [MPa]

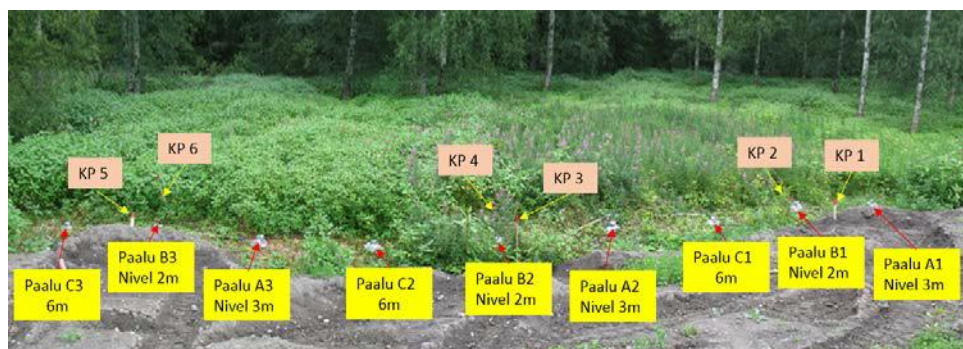
Venymäliuskamittauksen teoriaa ei käsitellä tarkemmin muuta kuin todetaan, että niiden asentamiseen ja kytkentään on erilaisia tapoja riippuen mitaustarpeesta. Tässä kohteessa liuskat kytkettiin siten, että ne ilmaisivat paalun poikkileikkaukseen kohdistuvan taivutusjännityksen, mutta eivät aksiaalista jännitystä.



Kuva 22. Paalujen anturointi venymäliuskoilla.

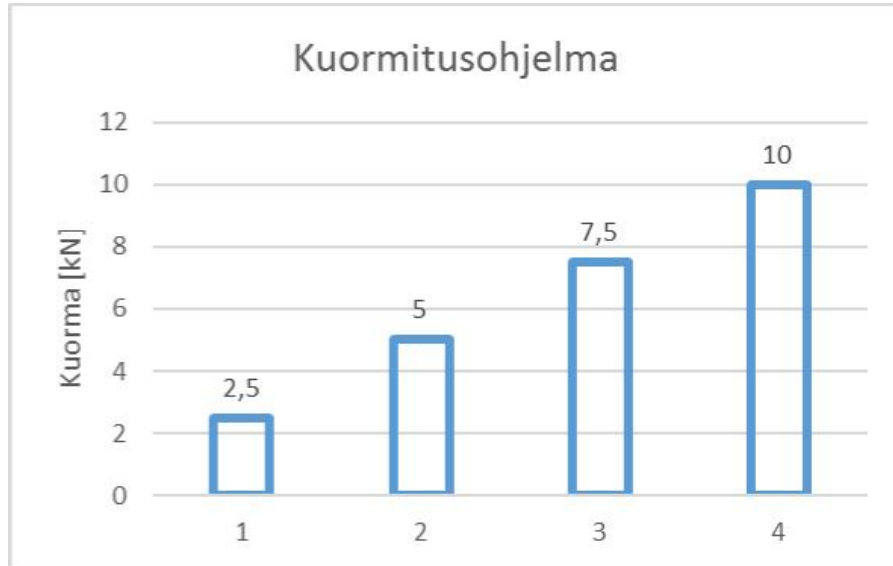
4.3 Koepaalujen asennus ja kokeen suoritus

Koepaalut asennettiin lyömällä yhteen riviin noin kahden metrin paaluvälillä. Kuvassa 23 on paalut asennettuina. Asennuksen jälkeen paaluja ympäröivän maan annettiin asettua kaksi kuukautta ennen kuin kuormitukset tehtiin.



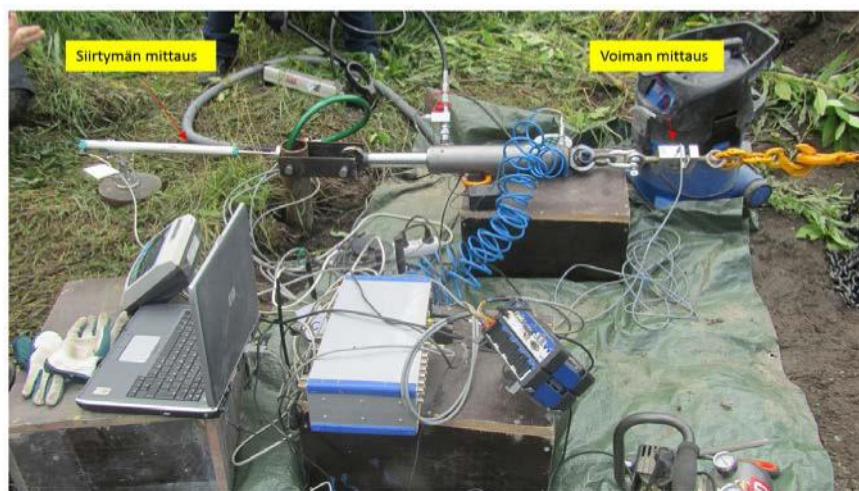
Kuva 23. Koepaalut asennettuna ja paikat, joista pohjatutkimukset tehtiin, merkittyinä.

Kuormitussarja suunniteltiin siten, että kuormitusta lisättiin 2,5 kN:n portaalla, kunnes saavutettiin maan murtokuorma. Kuormitusportaiden välissä kuormitus pudotettiin nollaan. Kuormaa pidettiin yllä noin kahden minuutin ajan, samoin kuormitusportaiden välissä pidettiin kahden minuutin tauko ennen seuraavaa kuormitusta. Näin mitattiin samalla hetkellisen ja pysyvän siirtymän kehitystä. Tämä vastaa Nirhamon opinnäytetyössään käyttämää kuormitusohjelmaa. Ainoastaan kuorman pitoajaksi katsottiin riittävän lyhyempi aika maaperäolosuhteista johtuen.



Kuva 24. Kokeen kuormitusohjelma.

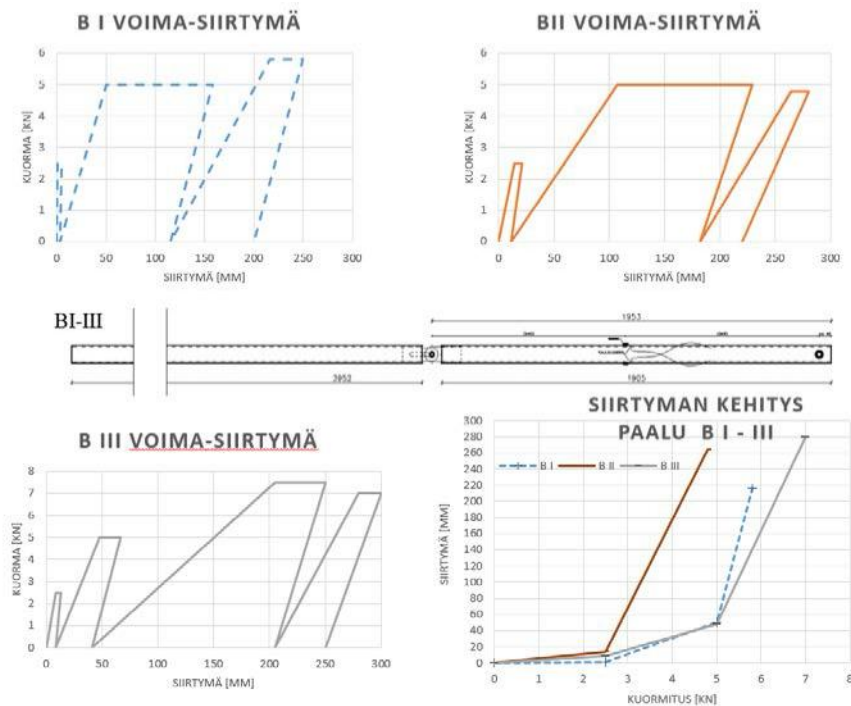
Käytettävissä olevasta tiedonkeruujärjestelmästä johtuen jouduttiin siirtymät ja kuormat merkitsemään käsin muistiin. Kuormitusten pito päällä ja pois päältä mitattiin sekunttikellolla. Venymäliuskojen kuormitushistoria saatiin osittain tallennettua muistiin jatkokäsittelyä varten. Kaikki venymäliuskat eivät toimineet kokeessa johtuen joko vaurioitumisesta paalujen asennuksen yhteydessä tai sitten veden päästessä johtimien jatkoskohtiin niiden suojauksista huolimatta.



Kuva 25. Valokuva paalun koekuormitusjärjestelyistä.

4.4 Kuormitusten tulokset

Kuvissa 26–27 on esitetty jokaiselle paalutyypille siirtymän kehitys, kun kuormaa on nostettu kuormitusportaittain sekä siirtymän kehitys, kun saavutettua kuormaa jokaisella portaalla on pidetty yllä noin kahden minuutin ajan. Lisäksi kuvissa olevissa kuvaajissa on esitetty jäännössiirtymä kuormituksen poiston jälkeen. Jokaiseen kuvaan on vielä koottu samaan kuvaajaan paalujen siirtymän kehitys. Siirtymät on mitattu kuormituspisteestä, jonka korkeus maanpinnasta kokeissa vaihteli välillä 240–390 mm. Venymäliuskoilla mitatut taivutusjännitykset on esitetty liitteessä 3. Valitettavasti käyttökelpoisia tuloksia saatiin vain paaluilla B II, B III ja C III.



Kuva 26. Paalujen B I–B III koekuormitusten tulokset.

Paaluilla B I ja B II (kuva 26) saatiin suoritettua vain kaksi kuormitusportasta, 2,5 ja 5 kN. Aloitettaessa 7,5 kN kuormitusportasta jouduttiin koe keskeyttämään kuormituspylväksen liikevaran (300 mm) loppumisen vuoksi. Ainoastaan paalulla B III päästiin 7,5 kN:n kuormitusportalle. Seuraavaa kuormitusportasta 10 kN ei enää saavutettu kuormituspylväksen liikevaran loppumisen vuoksi.

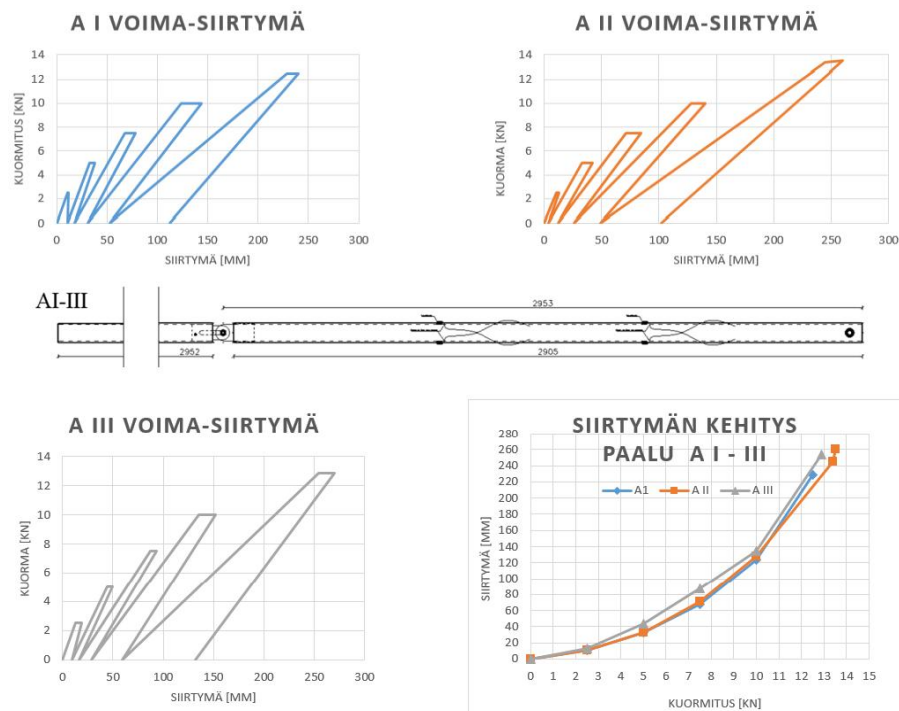
Mitään tekijää, joka selkeästi selittäisi eroavaisuuden paalujen B I ja B II tuloksissa verrattuna paaluun B III, ei löydetty mittaustapahtumaa analysoimalla. Painokairausdiagrammien (kairauspisteet nro 5 ja 6, Liite 1, sivu 3) mukaan maakerroksen laatu pinnasta noin kahden metrin syvyyteen oli melko samanlaista koko kuormitusalueella. Lisäksi voidaan havaita, että pysyvä siirtymä 5 kN:n kuormituksen jälkeen paalulla B III on ollut yli puolet pienempi kuin paaluilla B I ja B II. Yksi mahdollinen selitys voi olla, että maakerros paalun B III kohdalla on sisältänyt esimerkiksi juurakkoa tai muuta sellaista materiaalia, joka lujittaa maakerrosta.

Paalulla B II taas siirtymä alkoi kasvaa jo aloitettaessa 5 kN:n kuormitusportaan kuormitusta. Myöskään tälle ei löydetty mitään selkeää syytä, kun tarkasteltiin painokairausdiagrammeja (kairauspisteet nro 3 ja 4, Liite 1, sivu 3).

Yhteenvetona paalujen B I–BIII mittaustuloksista voidaan sanoa, että maa materiaalina on erittäin epätasainen ja sen ominaisuuksissa esiintyy pienelläkin alueella selkeitä eroavaisuuksia, joita ei ainakaan ilman tarkempia tutkimuksia suorittamatta maaperälle ei pysty selittämään.

Liitteen 3 taivutusjännitysten tasosta voidaan päätellä paalujen B II ja B III kiertyneen nivelen ympäri jäykkänä paaluna, jolloin voidaan todeta, että paalu itsessään ei ole kantanut kuormaa, vaan kaikki kuormitusvastus on maan paaluun kohdistamaa sivuvastusta.

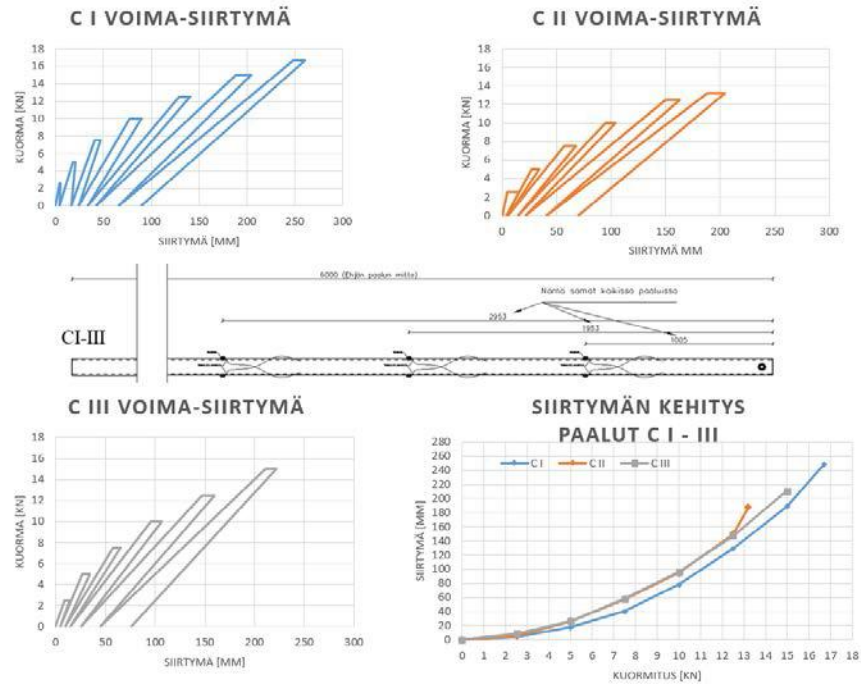
Paaluilla A I–A III (kuva 27) saavutettiin 12,5 kN:n kuormitusporras. Kuten painokairausdiagrammeista (ks. liite 1) nähdään, lujempi maakerros alkaa kahdesta metristä alaspäin, johon näissä paaluissa olevan nivelen voidaan todeta tunkeutuneen noin yhden metrin verran.



Kuva 27. Paalujen A I–A III koekuormitusten tulokset.

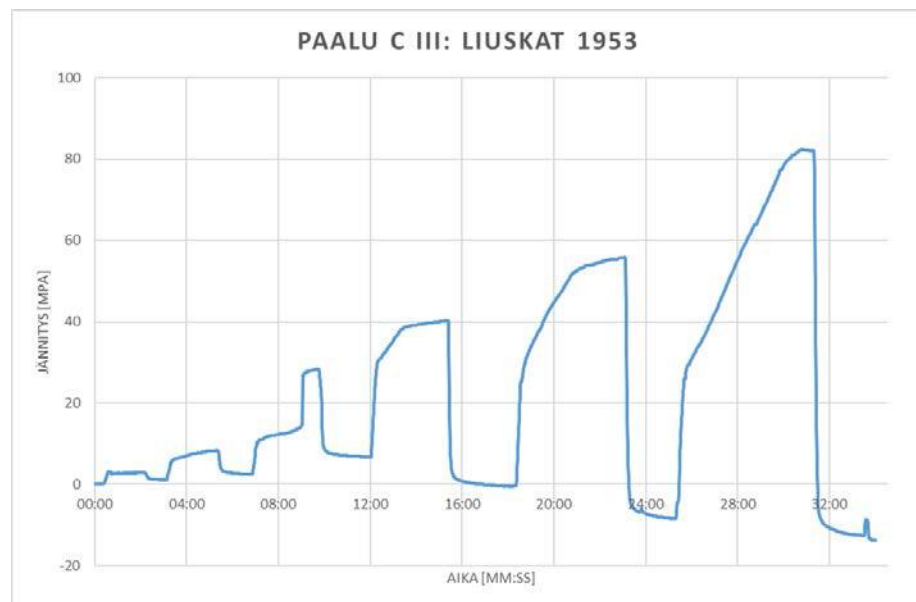
Kuvan 27 mittaustulokset ovat paljon enemmän toistensa kaltaisia, ja niiden tuloksia voidaankin pitää tilastollisesti luotettavampina kuin paaluilla B I–B III. Mittaustuloksista voidaan päätellä paalujen kiertyneen nyt pitkänä paaluna eli paalun poikkileikkauksen ottaneen kuormaa vastaan maan sivuvastuksen lisäksi. Tämä olisi varmaan ollut todettavissa myös venymäliuskamittauksista, mutta näillä paaluilla valitettavasti liuskat eivät toimineet.

Paalujen C I–C III (kuva 28) mittaustuloksista nähdäänkin selkeästi, että paalujen poikkileikkaukset ottavat vastaan kuormitusta. Paaluilla päästiinkin jo kuormituksissa parhaimmillaan yli 16 kN:iin ennen kuin käytettävissä ollut kuormituskalusto alkoi rajoittaa kuormitusten jatkamista.



Kuva 28. Paalujen C I–C III koekuormitusten tulokset.

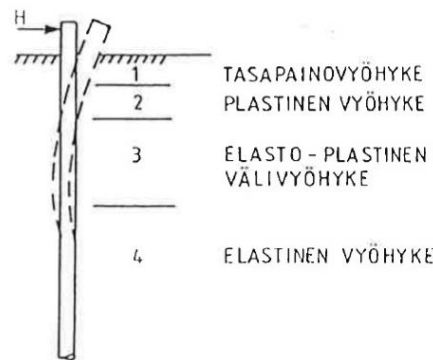
Paalusta C III saatiin niistä venymäliuskoista, jotka olivat juuri maakerrosten rajalla, mitattua paalun taivutusjännitys (kuva 29).



Kuva 29. Paaluun 1953 mm:n etäisyydelle paalun yläpäästä asennetuista venymäliuskoista laskettu paalun taivutusjännityskuvaaja eri kuormitusportailta.

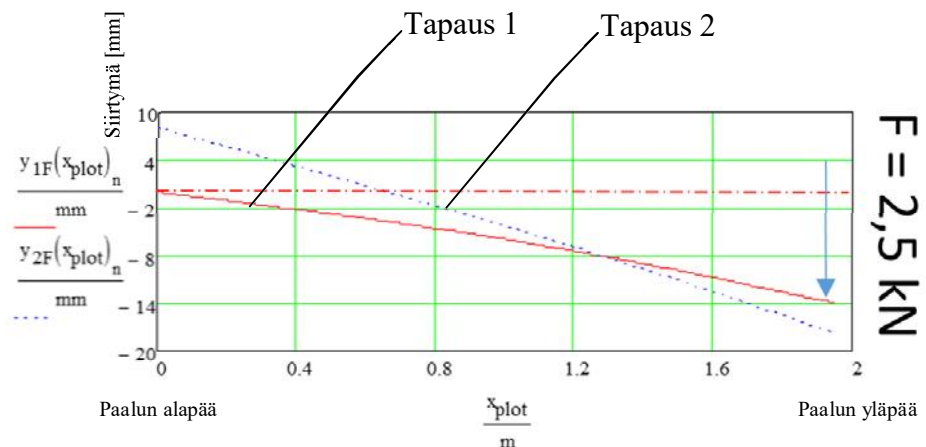
4.5 Maan sivuvastuksen arviointi mittaustulosten avulla

Vaakakuormitettua paalua ympäröivässä maassa erotetaan neljä erilaista maanpainevyöhykettä, jotka on esitetty kuvassa 30. Elastisessa vyöhykkeessä maanpaine on lineaarisesti verrannollinen sivusiirtymiin. Silloin ollaan vielä kuvassa 16 esitetyllä kuvaajalla siirtymää $y_m/6$ pienemällä alueella. Elasto-plastisella alueella maan sivuvastus muuttuu epälineaarisesti siirtymän muuttuessa. Plastisessa vyöhykkeessä maanpaine on sivuvastuksen ääriarvon p_m suuruinen. Tasapainovyöhykkeessä maanpaine on vakio ja siirtymä kasvaa, vaikka kuormitus ei kasva, eli maa on tällöin murtotilassa. (Nirhamo 1995, 41.)



Kuva 30. Maanpainevyöhykkeet. (Nirhamo 1995, 43.)

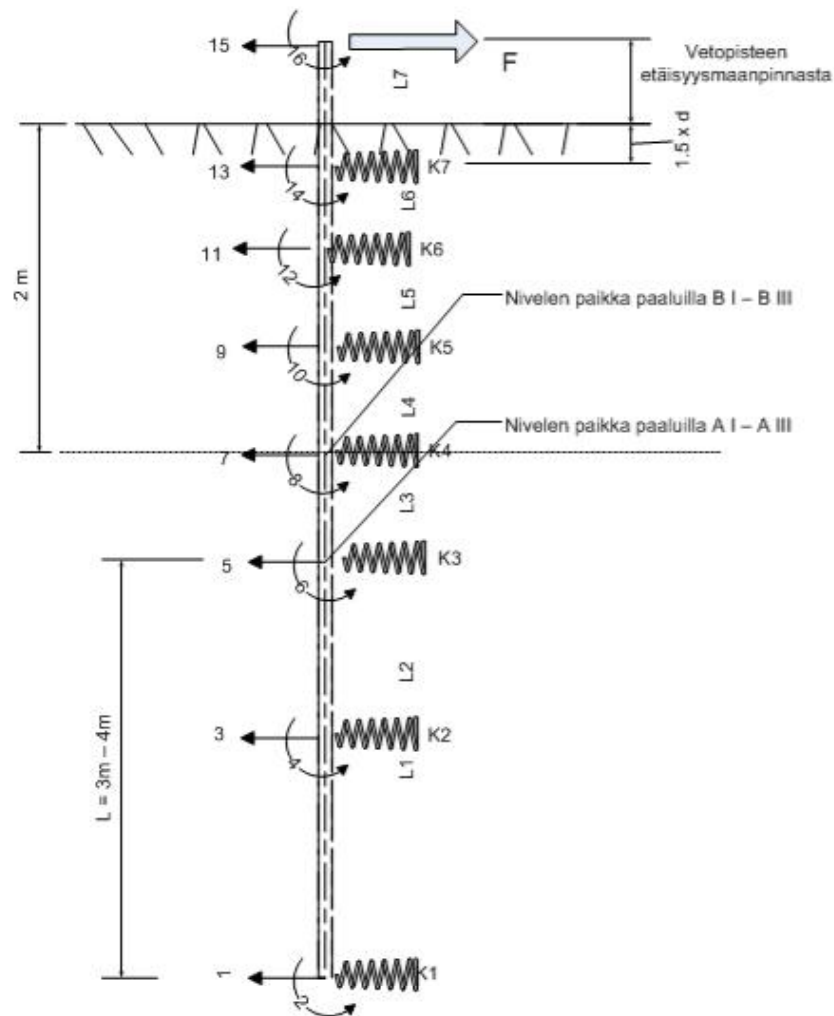
Oletetaan maan suljetuksi leikkauslujuudeksi $c_u = 2$ kPa ylemmälle maakerrokselle ja lasketaan nyt luvussa 3.2 esitetyllä Winklerin alustamallilla analyttisesti paalun, jonka mitat vastaavat nyt paaluja B I – III, pään vaaka-siirtymä kuormituksen arvolla 2,5 kN. Laskelmat on esitetty liitteessä 4. Laskelma on tehty kahdella erilaisella paalun alapään kiinnityksellä. Tapauksessa 1 paalun alapään siirtymä on estetty ja kiertymä vapaa. Tapauksessa 2 siirtymä ja kiertymä on sallittu. Tapaus 1 vastaa nyt koetilannetta ja tapauksen 2 avulla haluttiin nähdä, miten todellinen lyhyt paalu ($L = 1,95$ m) käyttäytyisi. Kuvassa 31 on esitetty paalun siirtymä molemmissa tapauksissa.



Kuva 31. Paalun siirtymä kuormalla 2,5 kN Winklerin alustamallin mukaisesti laskettuna.

Tapauksen 1, joka siis vastaa koetilannetta, maksimisiirtymä paalun päässä on 14 mm. Paalujen B I–II koetuloksista laskettu keskiarvo on 12 mm. Paalun B III tuloksia ei huomioitu, koska ne poikkesivat näistä kahdesta muusta.

Vastaava laskenta tehtiin vielä käyttäen numeerista menetelmää eli elementtimenetelmää (FEM) MathCad-ohjelmalla. Paaluista B I–B II muodostettiin laskentamalli, joka on esitetty kuvassa 32. Mallissa paalu on kuvattu neljän vapausasteen palkkielementillä ja maa yhden vapausasteen jousielementillä. Laskentamallin matemaattinen muodostus on esitetty liitteessä 5.



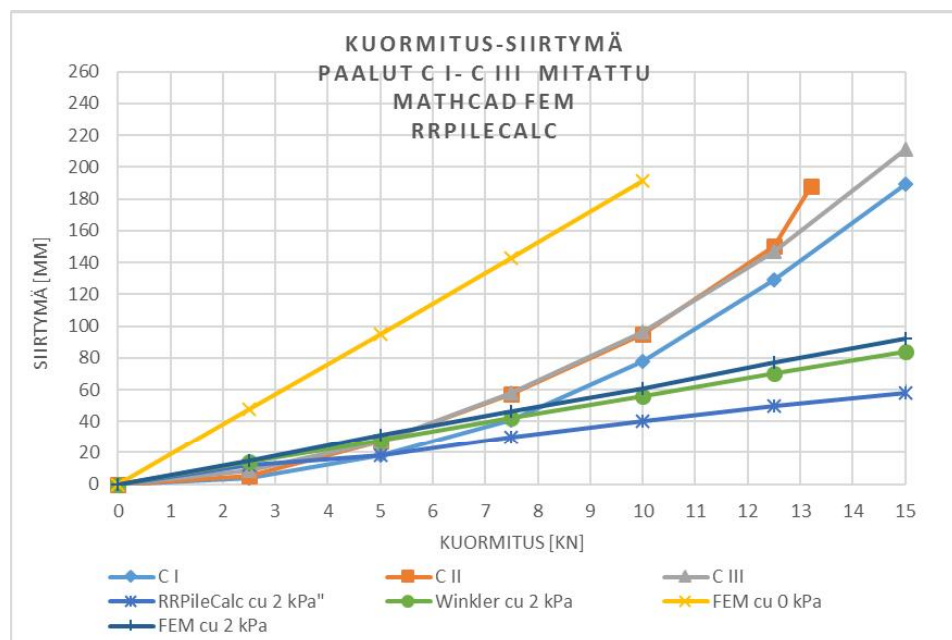
Kuva 32. Palkki- ja jousielementtimalli, joka kuvaa maahan asennettua paalua vaakuormituksen alaisena.

Tässä mallissa on huomioitu vetopisteen etäisyys maanpinnasta sekä koheesiomaassa esiintyvä sivuvastuksen vaikutuksen alkaminen maanpinnasta etäisyydellä 1,5 kertaa paalun halkaisija. Tällä mallilla laskettuna ($c_u = 2$ kPa) saadaan vetopisteen siirtymäksi 33 mm, joka on yli kaksi kertaa enemmän kuin Winklerin menetelmällä saatu tulos 14 mm. Muuttamalla maan suljetun leikkauslujuuden arvoksi $c_u = 5$ kPa, jolloin saadaan vetopisteen

siirtymäksi 11 mm, joka siis on jo lähellä mitattua keskiarvoa paaluilla B 1–B II.

Yllä siis oletettiin paalun vaakasiirtymän kuormitusportaalla 2,5 kN olevan vielä elastisella alueella, jolloin sivuvastuksen ja siirtymän välillä on lineaarinen yhteys. Seuraavilla kuormitusportailla maa on plastisessa tilassa ja sivuvastuksen ja siirtymän yhteys on siis epälineaarinen.

Seuraavaksi paaluista C I–C III muodostettiin RRPileCalciin laskentamalli. Lisäksi palkki-jousimallista muokattiin MathCad-ohjelmassa versio, jossa jousilta k5, k6 ja k7 poistettiin jäykkyys, joka kuvaa paalua 2 m:n mittaisena ulokepalkkina ja sillä laskettiin vetopisteen vastaavat siirtymät kuormitusten arvolla 2,5 kN, 5 kN, 7,5 kN, 10 kN, 12,5 kN ja 15 kN. Paalujen C I–III vastaavat tulokset sekä RRPileCalc:illa ja ulokemallilla (keltainen kuvaaja) lasketut tulokset on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Paalujen C I–C III mitatut siirtymän arvot sekä vastaavat lasketut arvot.

RRPileCalcin voidaan todeta antavan vastaavia tuloksia 5 kN:n kuormitukseen saakka kuin koekuormituksessa saatiin, mutta sen jälkeen tulokset eivät enää vastaa mitattuja arvoja. Tähän ei tässä työssä löydetty muuta selitystä kuin se, että kyseisessä koekuormituskohteessa saavutettiin pienillä vaakakuorman arvoilla jo niin suuria siirtymiä, joita ei käytännön rakentamiskohteissa esiinny.

Kuvassa 33 on vielä esitetty Winklerin menetelmällä ja kuvan 32 FEM-mallilla lasketut tulokset olettamalla suljetuksi leikkauslujuudeksi 2 kPa. Näissä molemmissa menetelmissä alustaluvun arvo on laskettu kaavalla 4, jossa alustaluvun kertoimena on käytetty arvoa 150. Siirtymän ylittäessä arvot $y_m/6$ ja y_m pitäisi alustaluvun arvoa pienentää kuvan 16 mukaisesti. Joh-tuen käsin laskennan työläydestä sitä ei tässä tehty.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä opinnäytetyössä oli tarkoitus suunnitella mittausmenetelmä, jolla voidaan mitata kohtuullisen tarkasti ja yksinkertaisesti maan antamaa sivuvastusta yhden paalun tapauksessa kuormitettaessa paalua sivusuunnassa staattisesti.

Käytännön mittauksissa saatiin mitattua paalun yläpään vaakasiirtymä kuormituksen funktiona. Näistä tuloksista ei kuitenkaan saatu johdettua sivuvastukselle arvoa, koska maaperästä ei määritetty leikkauslujuutta tarkemmin. Lisäksi kuormituslaitteisto oli alimitoitettu kokeisiin, jotta olisi selkeästi saavutettu tilanne kokeissa, jossa sivuvastus on vakio ja siirtymä kasvaa rajatta.

Työssä onnistuttiin kuitenkin kehittämään nivel paaluun, joka mahdollistaa paalun asentamisen normaalisti lyömällä, mutta ei kuitenkaan ota vastaan momenttia paalua kuormitettaessa vaakasuunnassa. Tämän avulla pystyttiin täyden mittakaavan kuormituskokeissa toteamaan, että periaatteessa koneita kantamaton maaperä antaa paalulle sivuvastusta.

Käytännössä tämän tyyppiselle maaperälle ei suunnitteluvaiheessa annettaisi minkäänlaisia lujuusarvoja, jolloin sen antamaa tukea ei huomioitaisi mitoituksessa lainkaan. Huomiota kannattaa kuitenkin kiinnittää siihen, että maan liikkeessä kohti paalua, se ei tiedä näistä mitoituskäytännöistä, vaan se kohdistaa paalun sivupainetta, joka on huomioitava paalun rakenteellisessa mitoituksessa.

Osittain työn tulosten hyödyntämistä haittasi maaperätutkimusten jääminen puutteelliseksi suljetun leikkauslujuuden määrittämisen osalta sekä venymäliuskamittausten epäonnistuminen johtoliitoksiin päässeen veden vuoksi.

Mittaustuloksista ei onnistuttu työn tekijän taidoilla määrittämään arvoa sivuvastukselle luotettavasti, joten siinä jäätii työn tavoitteista. Vaikka tässä kuormituskohteessa toivottuun lopputulokseen sivuvastuksen määrittämisen osalta ei päästy, voidaan kuitenkin todeta nivelellisen koepaaluun olevan käyttökelpoinen ainakin koheesiomaassa.

Nykyisillä laskentakaavoilla ja käytettävissä olevilla ohjelmistoilla ei näyttäisi olevan mahdollisuuksia tämän tyyppisen maalajin tapauksessa vielä määrittää sivuvastusta, tai vastaavasti maan siirtyessä paalua kohti, sivupainetta luotettavasti.

Työn yhtenä johtopäätöksenä voidaan todeta myös se, että käytännön kokeilla saadaan tuloksia, jotka ovat kyseiselle kohteelle todellisia ilman teoreettiseen tarkasteluun liittyviä epävarmuuksia. Suositeltavaa olisi, että rakennuskohteissa joissa epäillään laskelmien tuloksia, tehtäisiin entistä useammin koekuormituksia mitoituksen varmistamiseksi. Huolimatta kokeiden lisäkustannuksista, saatetaan kuitenkin säästää aikaa ja rahaa verrattuna siihen, että asiaa yritetään selvittää suunnittelupöydän ääressä kuitenkaan saavuttamatta luotettavia tuloksia.

LÄHTEET

- Aalto, J. (6. April 2018). Mycourses. Noudettu osoitteesta https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/506737/mod_folder/content/0/1_FI_kimmoisalla_alustalla_oleva_palkki_prof.Jukka.Aalto.pdf?forcedownload=1
- Ahokas, J.;& Oksanen, T. (2015). Maamekaniikka. Helsinki: Maataloustieteiden laitos.
- Hartikainen, O.-P. (2000). Maanrakennustekniikka. Helsinki: Otatieto, Gaudamus Helsinki University Press, HYY-yhtymä.
- Hartman, E. (2008). Paaluperustuksiin kohdistuvien sivukuormitusten vähentäminen - Toukorannan suojaseinä. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- Huang, J.-w. (2011). Development of modified p-y curves for Winkler Analysis to characterize the lateral load behavior of a single pile embedded in improved soft clay. Ames: Iowa State University.
- Isokangas, I. (2015). Kärjellä kantavan paalun nurjaldustarkastelu. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Jääskeläinen, R. (2009a). Geotekniikan perusteet. Jyväskylä: Tammertekniikka.
- Jääskeläinen, R. (2009b). Pohjarakennuksen perusteet. Jyväskylä: Tammermekaniikka / Amk-kustannus Oy.
- Koivula, T. (2016). Tarvittavan paalumäärän laskenta. Turku: Turun ammattikorkeakoulu. Talonrakennustekniikka.
- Korhonen, K.-H.; Gardemeister, R.;& Tammirinne, M. (1974). Geotekninen maaluokitus. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuslaitos.
- Kulmala, H. (2013). Pohjarakennus (INRA), 3 op. Hämeenlinna.
- Luukkonen, S. (2015). Sivukuormitettujen pylväasperustusten geotekninen käyttäytyminen. Espoo: Aalto-yliopisto.
- Nirhamo, J. (1995). Teräspalkkipaalulla perustettu meluseinä. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Nummelin, M.;& Tolla, P. (1. December 2016). Liikennevirasto. Noudettu osoitteesta Liikenneviraston julkaisut: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2016-32_sivukuormitettujen_pylvasperustusten_web.pdf
- Nummelin, M.;& Tolla, P. (2017). Eurokoodin soveltamisohje - Geotekninen suunnittelu - NCCI 7. Helsinki: Liikennevirasto.

Paliwal, G. (7. November 2016). Pile-foundation-basics. Noudettu osoitteesta SlideShare: <https://www.slideshare.net/GauravPaliwal15/pile-foundation-basics>

Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). Pile foundation analysis and design. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Rantamäki, M.;Jääskeläinen, R.;& Tammirinne, M. (1979). Geotekniikka. Helsinki: Otatieto Oy. Yliopistokustannus University Press Finland Ltd. HYY_yhtymä.

Rasi-Koskinen, H. (2014). Vaakasuuntaiset alustaluvut paaluperusteisissa silloissa. Oulu: Oulun Yliopisto.

Riihimäki, T. (2016). RIL 254-2016 Paalutusohje PO-2016. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL.

RIL. (2011). Paalutusohje 2011. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.


Slunga, E. (28. January 2017). Rakennustieto. Noudettu osoitteesta [www.rakennustieto.fi: https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK00s669.pdf](https://www.rakennustieto.fi/downloads/RK/RK00s669.pdf)

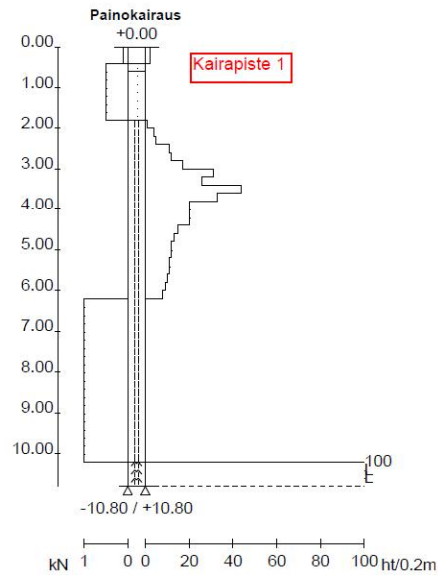
SSAB Europe Oy. (3. December 2017). SSAB:n teräspaalaus pientalorakentajalle. Noudettu osoitteesta SSAB Construction and building: <http://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/infrastrukturi/tuotteet/steel-piles-for-detached-house>


SSAB Europe Oy. (8. April 2018). SSAB Infrastrukturi. Noudettu osoitteesta SSAB Construction and Building: https://ssabwebsitescdn.azureedge.net/-/media/files/fi/infra/ssab_rr_ja_rd_paalut_suunnitelu_ja_asennusohjeet.pdf

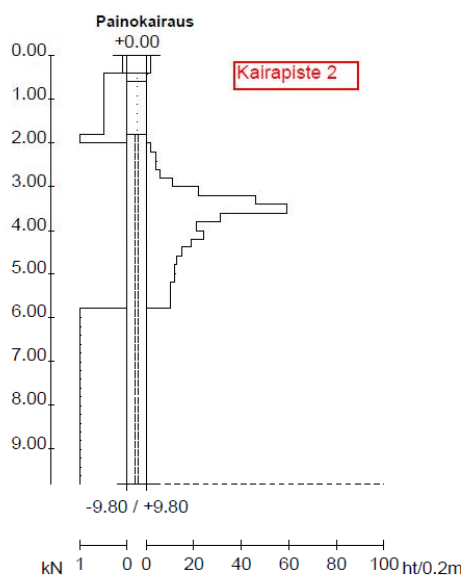
Young, W.;& Budynas, R. (2002). Roark's formulas for stress and strain. New York: McGraw-Hill.


Painokairausten tulokset koekuormitusalueelta

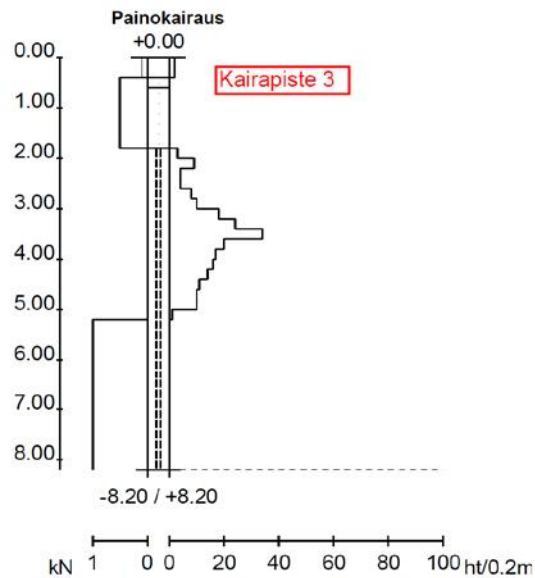
	Hämeen Rakennus ja Tutkimus		kairauspvm. 16.12.2015
	Rusinpelto 12 13430 Hämeenlinna P. 0400 835 653		Kairapiste no: 1
Kohde	Vankanlähde 13 Hämeenlinna		17242




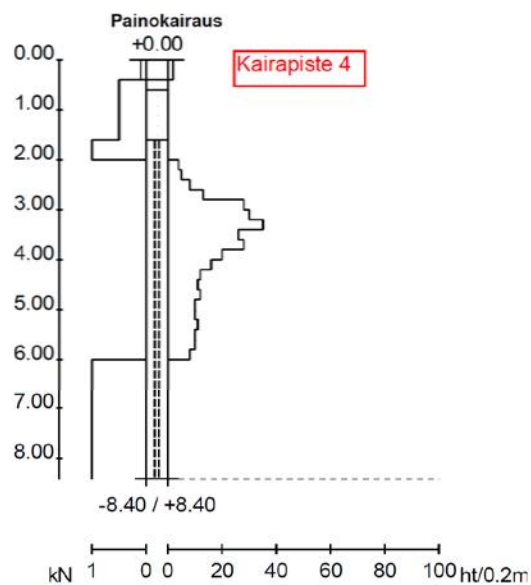
	Hämeen Rakennus ja Tutkimus		kairauspvm. 16.12.2015
	Rusinpelto 12 13430 Hämeenlinna P. 0400 835 653		Kairapiste no: 2
Kohde	Vankanlähde 13 Hämeenlinna		17242




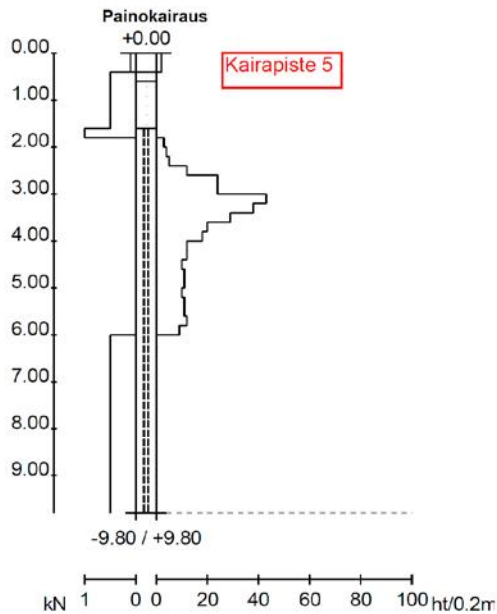
	Hämeen Rakennus ja Tutkimus Rusinpelto 12 13430 Hämeenlinna P. 0400 835 653	kairauspvm. 16.12.2015 Kairapiste no: 3
	17242	
Kohde Vankanlähde 13 Hämeenlinna		




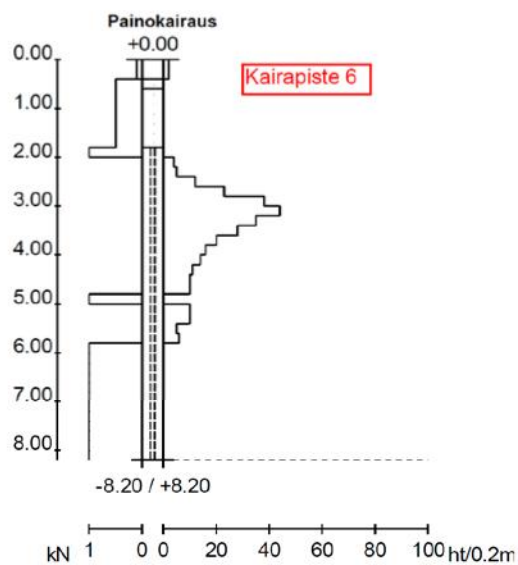
	Hämeen Rakennus ja Tutkimus Rusinpelto 12 13430 Hämeenlinna P. 0400 835 653	kairauspvm. 16.12.2015 Kairapiste no: 4
	17242	
Kohde Vankanlähde 13 Hämeenlinna		



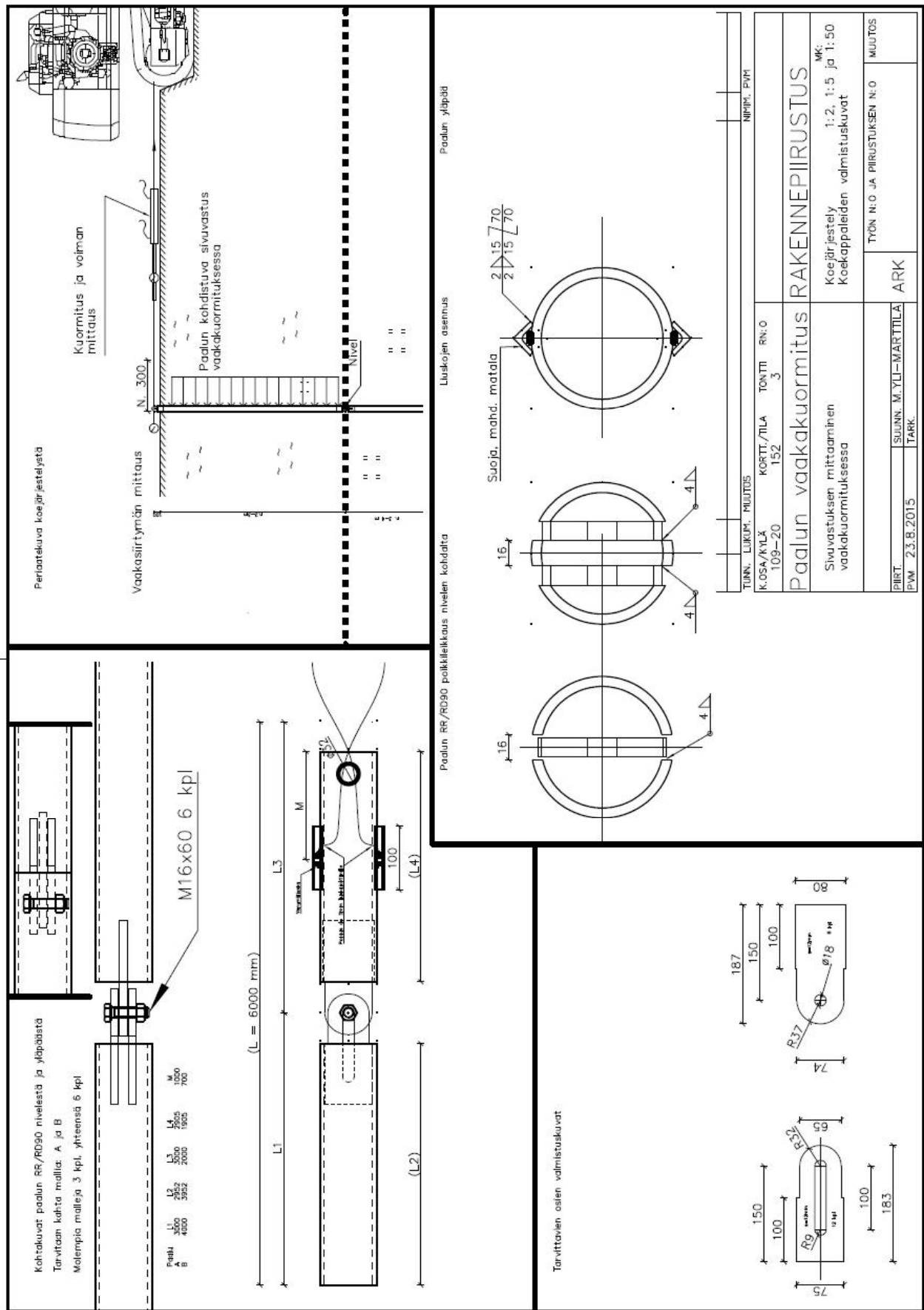
	Hämeen Rakennus ja Tutkimus Rusinpelto 12 13430 Hämeenlinna P. 0400 835 653	kairauspvm. 16.12.2015 Kairapiste no: 5
	17242	
Kohde	Vankanlähde 13 Hämeenlinna	



	Hämeen Rakennus ja Tutkimus Rusinpelto 12 13430 Hämeenlinna P. 0400 835 653	kairauspvm. 16.12.2015 Kairapiste no: 6
	17242	
Kohde	Vankanlähde 13 Hämeenlinna	



Koepaalujen valmistuskuva



Paalun nivelen mitoituslaskelmat

$$\text{Teräs materiaali} \quad f_y := 355 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_u := 510 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad t_1 := 12 \cdot \text{mm} \quad t_2 := 12 \cdot \text{mm}$$

Pultit M16 8.8

$$f_{ub} := 800 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{yb} := 680 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad d_b := 16 \cdot \text{mm}$$

$$A_b := \pi \cdot \frac{d_b^2}{4} = 201 \cdot \text{mm}^2 \quad A_{sb} := 0.78 \cdot A_b = 157 \cdot \text{mm}^2$$

$$\gamma_{M2} := 1.25$$

Ruuvien vetokestävyys

$$k_2 := 0.9$$

$$F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_{sb}}{\gamma_{M2}} = 90 \cdot \text{kN} \quad +$$

Ruuvien leikkauskestävyys

$$\alpha_v := 0.6$$

$$F_{v,Rd} := \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_{sb}}{\gamma_{M2}} = 60 \cdot \text{kN} \quad (\text{leikettä kohden})$$

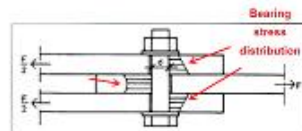
Reunapuristuskestävyys

$$e_1 := 48 \text{mm} \quad e_2 := 35 \text{mm}$$

$$e_4 := 1.5 \cdot d_b = 24 \cdot \text{mm} \quad e_3 := 1.5 \cdot d_b = 24 \cdot \text{mm} \\ (\text{pidennetyille reille})$$

$$p_1 := 0 \text{mm} \quad p_2 := 0 \text{mm}$$

$$\alpha_d := \min \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_b}, \left| \begin{array}{l} \frac{e_1}{3 \cdot d_b} \text{ if } p_1 \leq 0 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_b} - \frac{1}{4} \text{ otherwise} \end{array} \right|, 1 \right) \quad \alpha_d = 1$$

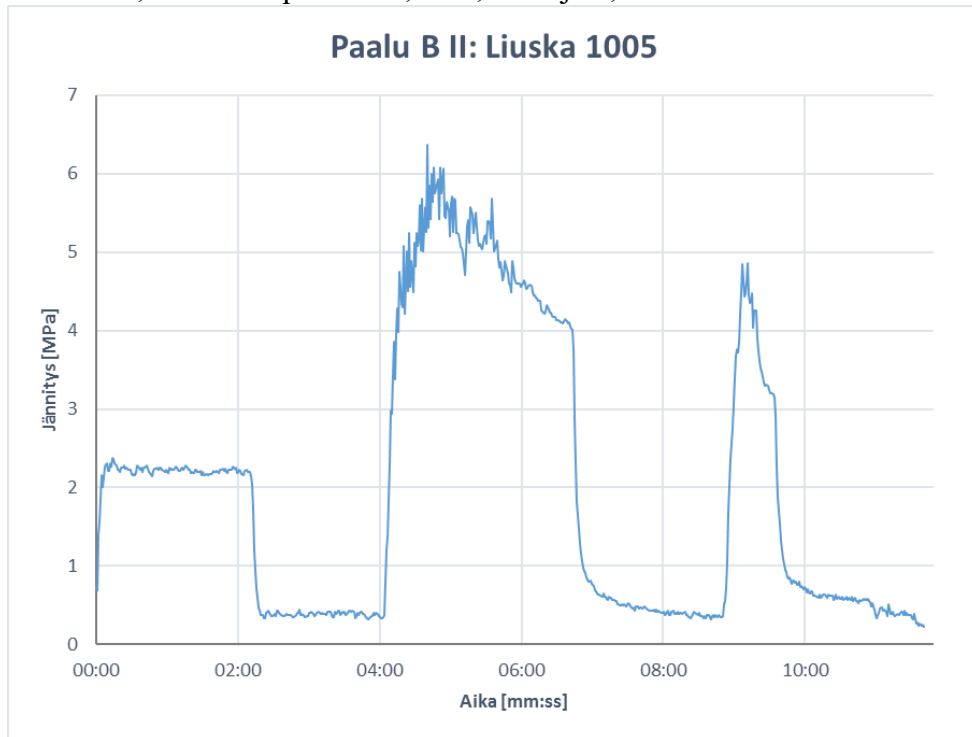


$$k_1 := \min \left(\frac{2.8 \cdot e_2}{d_b} - 1.7, \left| \begin{array}{l} \frac{2.8 \cdot e_2}{d_b} - 1.7 \text{ if } p_2 \leq 0 \\ \frac{1.4 \cdot p_2}{d_b} - 1.7 \text{ otherwise} \end{array} \right|, 2.5 \right) = 2.5$$

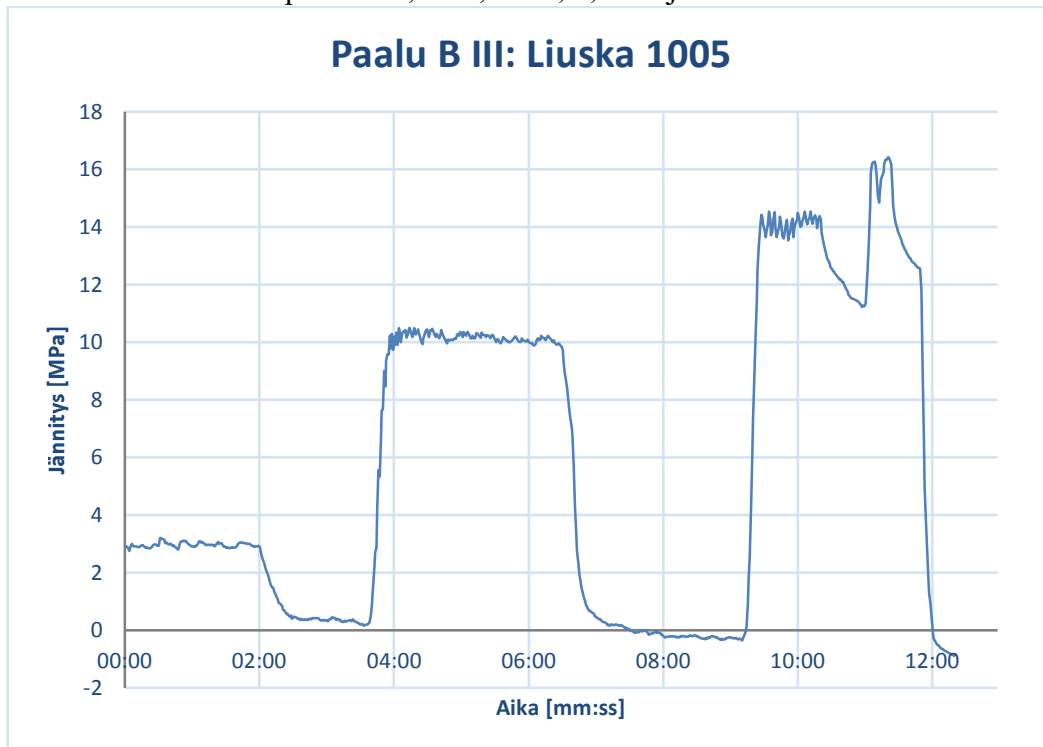
$$F_{bearing,Rd} := \frac{k_1 \cdot \alpha_d \cdot f_u \cdot d_b \cdot t_1}{\gamma_{M2}} = 196 \cdot \text{kN}$$

Paalujen venymäliuskojen mittaustulokset

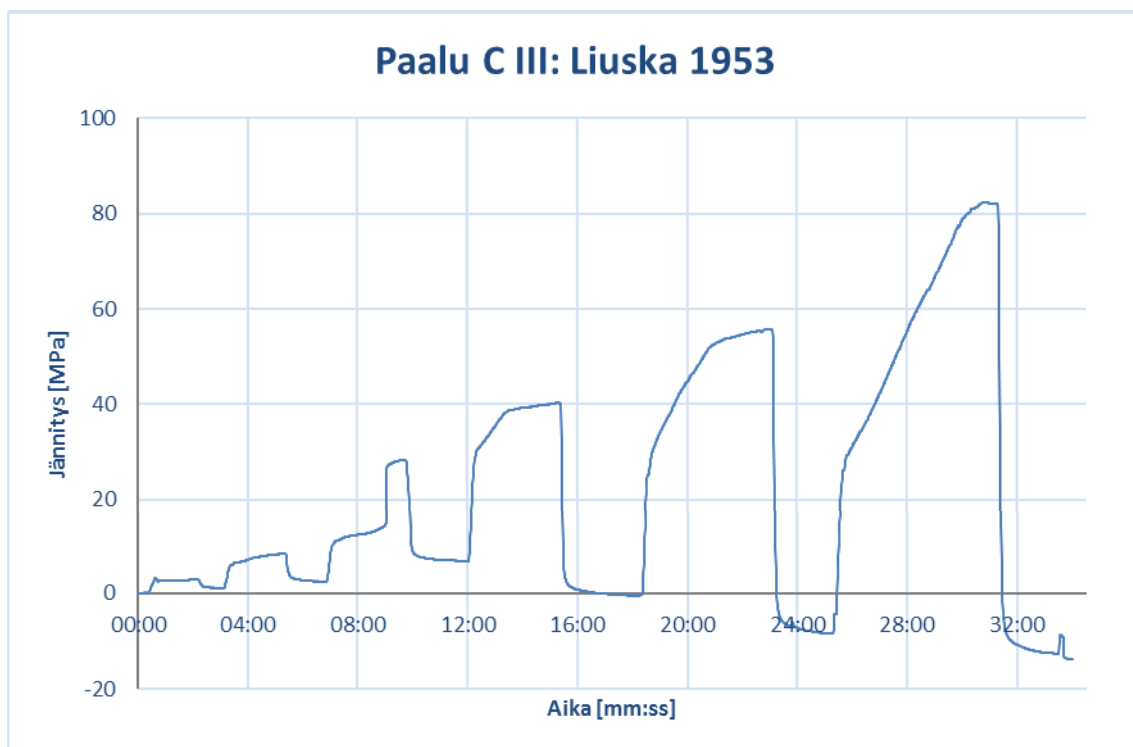
Paalu B II, kuormitusportaat: 2,5 kN, 5 kN ja 4,8 kN



Paalu B III kuormitusportaat: 2,5 kN, 5 kN, 7,5 kN ja 7 kN



Paalu C III, kuormitusportaat: 2,5 kN, 5 kN, 7,5 kN , 10 kN, 12,5 kN ja 15 kN

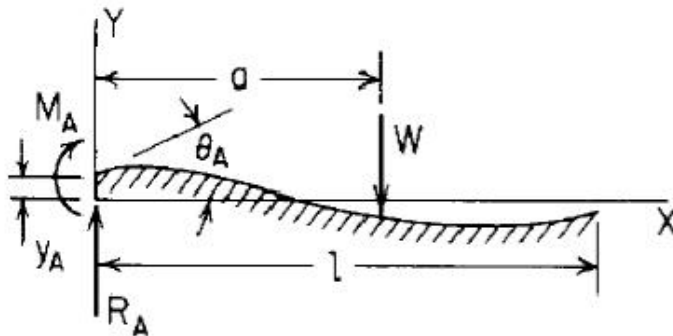


Sivusiirtymän laskenta Winklerin alustamallilla

Alustava arvoitus sivuvastukselle Winklerin alustamallia hyödyntäen

Pistekuorma palkilla, s. 213
(Roarks's Formulas for Stress and Strain)

1. Concentrated intermediate load



$$L_u := 1.950 \text{ m}$$

Paalun pituus, vetopiste huomoitu
(tässä maanpinta on samassa
tasossa kuin vetopiste)

$$c_u := 2 \cdot \text{kPa}$$

Suljettu leikkauslujuus, arvaus

$$p_m := 9c_u = 18 \cdot \text{kPa}$$

Lyhytaikaisille
kuormille

Paalun ominaisuudet RR90

$$d := 88.9 \text{ mm}$$

$$t := 6.3 \text{ mm}$$

$$f_{ypile} := 440 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$I_{pile} := 1402361 \text{ mm}^4$$

$$W_{pile} := 31549 \text{ mm}^3$$

$$E := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Paalun plastinen momentti

$$M_u := 1.2 f_{ypile} \cdot W_{pile} = 17 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$k_s := 150 \cdot \frac{c_u}{d} = 3.4 \frac{\text{MN}}{\text{m}^3}$$

Alustaluku

+

$$y_m := \frac{p_m}{k_s} = 5.3 \cdot \text{mm}$$

$$y_{m_6} := \frac{y_m}{6} = 0.9 \cdot \text{mm}$$

$$k_o := k_s$$

$$b_o := d$$

Paalun halkaisija

$$a := 1L$$

Pistekuorman sijainti

$$\begin{aligned}
 \underline{W} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 2.5\text{kN} \\ 5\text{kN} \\ 7.5\text{kN} \\ 10\text{kN} \\ 12.5\text{kN} \\ 15\text{kN} \end{pmatrix} \quad \text{Pistekuorma = vaakakuorma} \\
 \beta &:= \left(\frac{b_o \cdot k_o}{4 \cdot E \cdot I_{\text{pile}}} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.71 \frac{1}{\text{m}} \quad \text{Muuttuja} \\
 \beta \cdot L &= 1.385 \quad \text{if}(\beta \cdot L < 6, \text{"Voi käyttää"}, \text{"Katso taulukko 6 Roarkista"}) = \text{"Voi käyttää"}
 \end{aligned}$$

Apufunktiot

$$F_1(x) := \cosh(\beta \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot x)$$

$$F_2(x) := \cosh(\beta \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot x) + \sinh(\beta \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot x)$$

$$F_3(x) := \sinh(\beta \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot x)$$

$$F_4(x) := \cosh(\beta \cdot x) \cdot \sin(\beta \cdot x) - \sinh(\beta \cdot x) \cdot \cos(\beta \cdot x)$$

$$F_{a1}(x) := \begin{cases} 1 & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \cdot \cosh\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right] \cdot \cos\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right]$$

$$F_{a2.1}(x) := \cosh\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right] \cdot \sin\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right]$$

$$F_{a2.2}(x) := \sinh\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right] \cdot \cos\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right]$$

$$F_{a2}(x) := F_{a2.1}(x) + F_{a2.2}(x)$$

$$F_{a3}(x) := \sinh\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right] \cdot \sin\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right]$$

$$F_{a4.1}(x) := \cosh\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right] \cdot \sin\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right]$$

$$F_{a4.2}(x) := \sinh\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right] \cdot \cos\left[\beta \cdot \begin{cases} (x - a) & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}\right]$$

$$F_{a4}(x) := F_{a4.1}(x) - F_{a4.2}(x)$$

$$F_{a5}(x) := \begin{cases} 1 & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} - F_{a1}(x)$$

$$F_{a6}(x) := 2 \cdot \beta \cdot (x - a) \cdot \begin{cases} 1 & \text{if } x - a > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} - F_{a2}(x)$$

Vakiot

$$C_1 := \cosh(\beta \cdot L) \cdot \cos(\beta \cdot L)$$

$$C_2 := \cosh(\beta \cdot L) \cdot \sin(\beta \cdot L) + \sinh(\beta \cdot L) \cdot \cos(\beta \cdot L)$$

$$C_3 := \sinh(\beta \cdot L) \cdot \sin(\beta \cdot L)$$

$$C_4 := \cosh(\beta \cdot L) \cdot \sin(\beta \cdot L) - \sinh(\beta \cdot L) \cdot \cos(\beta \cdot L)$$

$$C_{a1} := \cosh[\beta \cdot (L - a)] \cdot \cos[\beta \cdot (L - a)]$$

$$C_{a2} := \cosh[\beta \cdot (L - a)] \cdot \sin[\beta \cdot (L - a)] + \sinh[\beta \cdot (L - a)] \cdot \cos[\beta \cdot (L - a)]$$

$$C_{a3} := \sinh[\beta \cdot (L - a)] \cdot \sin[\beta \cdot (L - a)]$$

$$C_{a4} := \cosh[\beta \cdot (L - a)] \cdot \sin[\beta \cdot (L - a)] - \sinh[\beta \cdot (L - a)] \cdot \cos[\beta \cdot (L - a)]$$

$$C_{a5} := 1 - C_{a1}$$

$$C_{12} := \cosh(\beta \cdot L) \cdot \sinh(\beta \cdot L) + \sin(\beta \cdot L) \cdot \cos(\beta \cdot L)$$

$$C_{a6} := 2 \cdot \beta \cdot (L - a) - C_{a2}$$

$$C_{13} := \cosh(\beta \cdot L) \cdot \sinh(\beta \cdot L) - \sin(\beta \cdot L) \cdot \cos(\beta \cdot L)$$

$$C_{11} := \sinh(\beta \cdot L)^2 - \sin(\beta \cdot L)^2$$

$$C_{14} := \sinh(\beta \cdot L)^2 + \sin(\beta \cdot L)^2$$

TAPAUS 1

Palkin toinen pää niveltuettu ja toinen vapaa

Taulukko 8.5, s.214

$$M_a := 0 \quad y_a := 0$$

$$R_a := W \cdot \frac{C_3 \cdot C_{a2} - C_4 \cdot C_{a1}}{C_{13}}$$

$$\theta_a := \frac{W}{2 \cdot \beta^2 \cdot E \cdot I_{\text{pile}}} \cdot \frac{C_1 \cdot C_{a2} - C_2 \cdot C_{a1}}{C_{13}}$$

$$V_{1F}(x) := R_a \cdot F_1(x) - y_a \cdot 2 \cdot E \cdot I_{\text{pile}} \cdot \beta^3 \cdot F_2(x) - \theta_a \cdot 2 \cdot E \cdot I_{\text{pile}} \cdot \beta^2 \cdot F_3(x) - M_a \cdot \beta \cdot F_4(x) - W \cdot F_{a1}(x)$$

$$M_{1F}(x) := M_a \cdot F_1(x) + \frac{R_a}{2 \cdot \beta} \cdot F_2(x) - y_a \cdot 2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2 \cdot F_3(x) - \theta_a \cdot \beta \cdot E \cdot I_{pile} \cdot F_4(x) - \frac{W}{2 \cdot \beta} \cdot F_{a2}(x)$$

$$\theta_{1F}(x) := \theta_a \cdot F_1(x) + \frac{M_a}{2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta} \cdot F_2(x) + \frac{R_a}{2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2} \cdot F_3(x) - y_a \cdot \beta \cdot F_4(x) - \left(\frac{W}{2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2} \right) \cdot F_{a3}(x)$$

$$y_{1F}(x) := y_a \cdot F_1(x) + \frac{\theta_a}{2 \cdot \beta} \cdot F_2(x) + \frac{M_a}{2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2} \cdot F_3(x) + \frac{R_a}{4 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^3} \cdot F_4(x) - \frac{W}{4 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^3} \cdot F_{a4}(x)$$

$$x_{plot} := 0,5mm \dots L$$

TAPAUS 2

Palkin molemmat päät vapaat

Taulukko 8.5, s.214

$$M_b := 0$$

$$\theta_b := \frac{W}{2 \cdot \beta^2 \cdot E \cdot I_{pile}} \cdot \frac{C_2 \cdot C_{a2} - 2C_3 \cdot C_{a1}}{C_{11}}$$

$$y_b := \frac{W}{2 \cdot \beta^3 \cdot E \cdot I_{pile}} \cdot \frac{C_4 \cdot C_{a1} - C_3 \cdot C_{a2}}{C_{11}}$$

$$V_{2F}(x) := R_b \cdot F_1(x) - y_b \cdot 2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^3 \cdot F_2(x) - \theta_b \cdot 2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2 \cdot F_3(x) - M_b \cdot \beta \cdot F_4(x) - W \cdot F_{a1}(x)$$

$$M_{2F}(x) := M_b \cdot F_1(x) + \frac{R_b}{2 \cdot \beta} \cdot F_2(x) - y_b \cdot 2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2 \cdot F_3(x) - \theta_b \cdot \beta \cdot E \cdot I_{pile} \cdot F_4(x) - \frac{W}{2 \cdot \beta} \cdot F_{a2}(x)$$

$$\theta_{2F}(x) := \theta_b \cdot F_1(x) + \frac{M_b}{2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta} \cdot F_2(x) + \frac{R_b}{2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2} \cdot F_3(x) - y_b \cdot \beta \cdot F_4(x) - \left(\frac{W}{2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2} \right) \cdot F_{a3}(x)$$

$$y_{2F}(x) := y_b \cdot F_1(x) + \frac{\theta_b}{2 \cdot \beta} \cdot F_2(x) + \frac{M_b}{2 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^2} \cdot F_3(x) + \frac{R_b}{4 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^3} \cdot F_4(x) - \frac{W}{4 \cdot E \cdot I_{pile} \cdot \beta^3} \cdot F_{a4}(x)$$

$$x_{\text{plot}} := 0,5\text{mm}..L$$

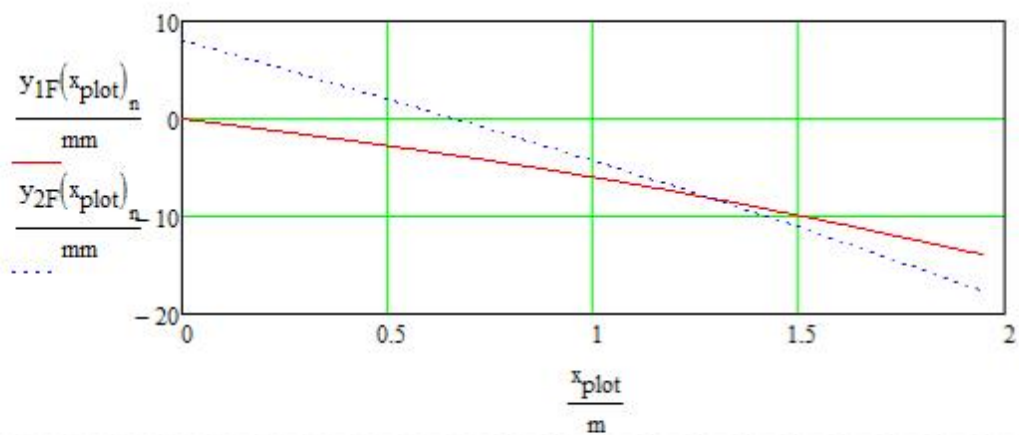
$$n := 2$$

TAPAUS 1

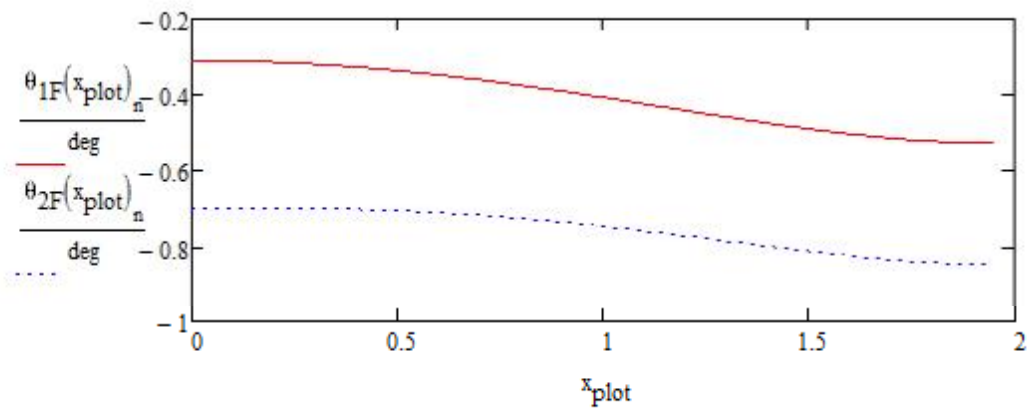
TAPAUS 2

$$W = \begin{pmatrix} 0 \\ 2.5 \\ 5 \\ 7.5 \\ 10 \\ 12.5 \\ 15 \end{pmatrix} \cdot \text{kN} \quad -y_{1F}(L) = \begin{pmatrix} 0 \\ 14 \\ 28 \\ 42 \\ 56 \\ 70 \\ 84 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad -y_{2F}(L) = \begin{pmatrix} 0 \\ 18 \\ 35 \\ 53 \\ 71 \\ 88 \\ 106 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad +$$

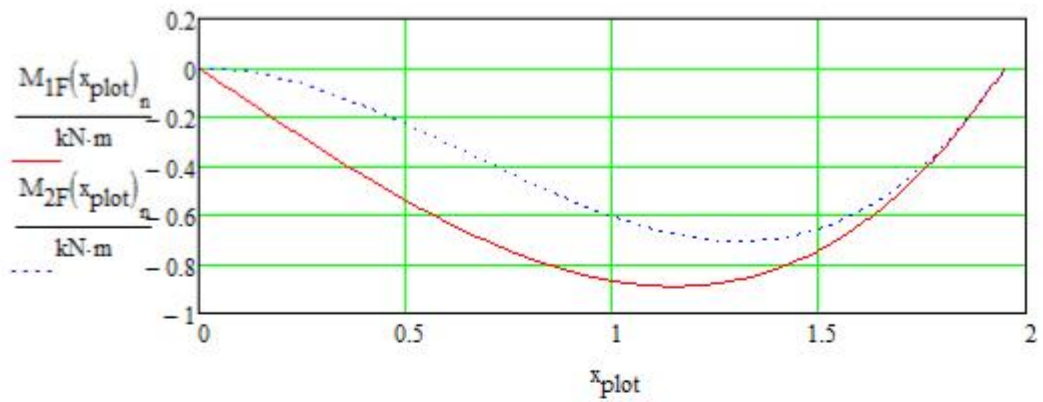
Paalun taipuma vaakavoimasta



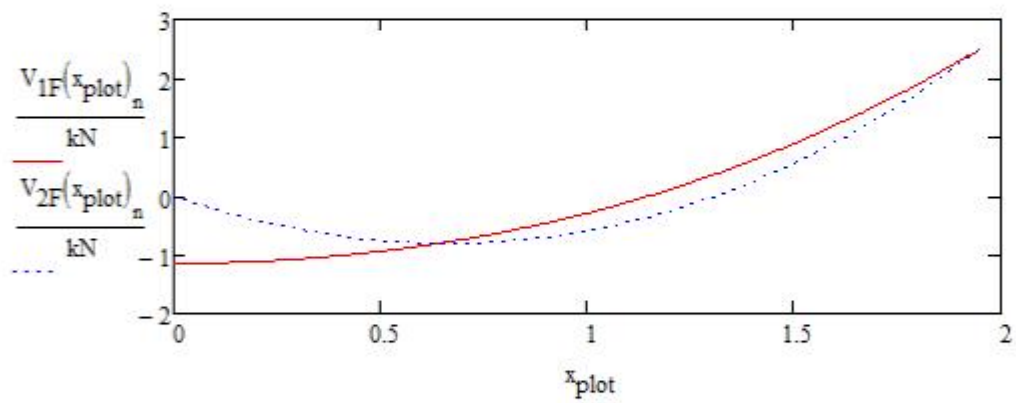
Paalun kiertymä vaakavoimasta



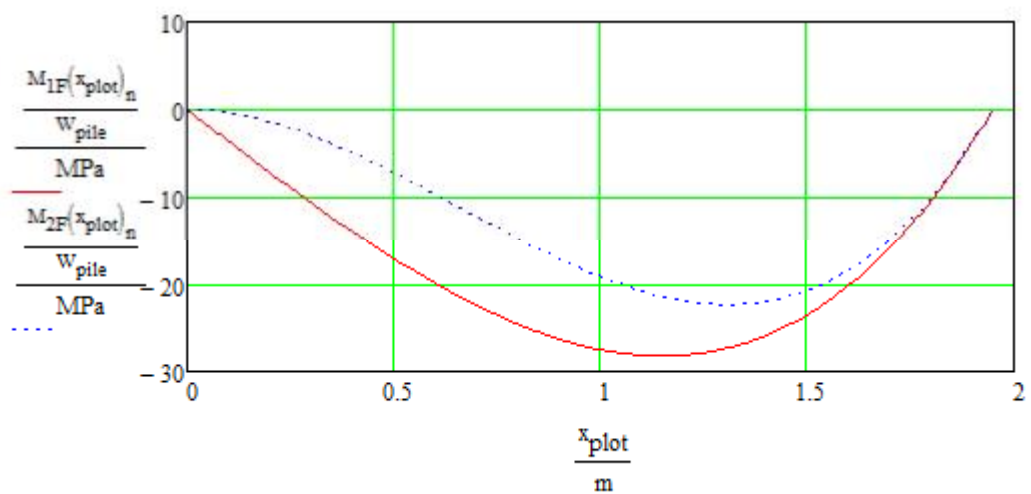
Paalun taivutusmomentti vaakavoimasta



Paalun leikkausvoima vaakavoimasta



Paalun taivutusjännitys (σ) vaakavoimasta



$$x_{\text{plot}} := 0$$

Tapaus 1

$$\sigma_1(x_{\text{plot}}) := \frac{M_{1F}(x_{\text{plot}})_n}{W_{\text{pile}}}$$

$$x_{\text{start1}} := \text{Minimize}(\sigma_1, x_{\text{plot}}) = 1.1 \text{ m}$$

Maksimi jännityksen etäisyys

$$\sigma_2(x_{\text{plot}}) := \frac{M_{2F}(x_{\text{plot}})_n}{W_{\text{pile}}}$$

$$x_{\text{plot}} := 1000 \text{ mm}$$

$$x_{\text{start2}} := \text{Minimize}(\sigma_2, x_{\text{plot}}) = 1.3 \text{ m}$$

Tuennan vaikutus jännityshuipun paikkaan

$$x_{\text{start2}} - x_{\text{start1}} = 160 \text{ mm}$$

Paalun vaakasiirtymän laskenta elementtimenetelmällä

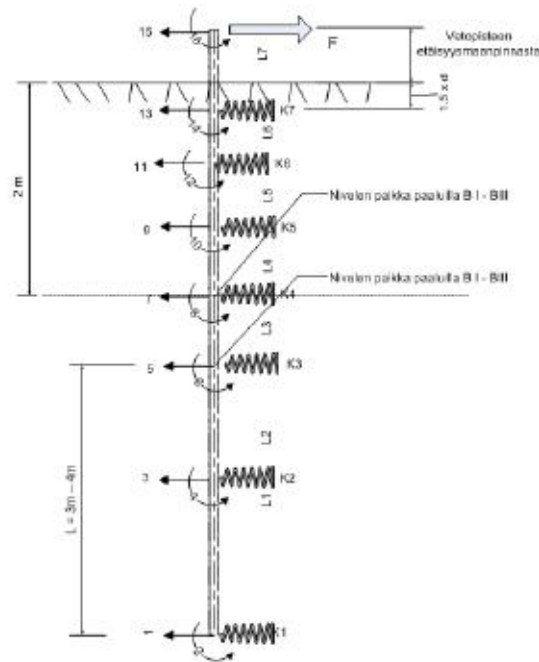
MIKA YLI-MARTTILA

ORIGIN := 1

Paalun dimensiot

$$d := 88.9 \text{ mm}$$

$$t := 6.3 \text{ mm}$$



$$\beta := 0 \quad 0 \text{ 10 kier. vapautettu}$$

1 muuten

$$\alpha := 1 \quad 0 \text{ 9 kier. vapautettu}$$

1 muuten

$$\text{disp}_1 := 1 \quad 1 \text{ siirtymä 1 lukittu}$$

0 siirtymä sallittu

$$F_A := 2500 \text{ N}$$

Paalun pään vaakavoima

$$c_m := 49 \text{ mm}$$

Vetopiste paalun päästä

$$L_{\text{pile}} := 5970 \text{ mm} - c = 5.921 \text{ m}$$

Paalun pituus

$$h := 285 \text{ mm}$$

Vetopisteen korkeus maanpinnasta

$$L7 := h + 1.5 \cdot d$$

Elementin pituus, johon ei kohdistu maasta sivuvastusta

$$c_{u2} := 2 \text{ kPa}$$

Suljettu leikkauslujuus pinnasta 2m

$$c_u := 15 \text{ kPa}$$

Suljettu leikkauslujuus 2m - 6m

$$L1 := 2.065 \text{ m}$$

Elementin 1 pituus

$$L2 := 0.95 \text{ m}$$

Muut elementit

$$L3 := 1 \text{ m}$$

$$L4 := \frac{[L_{\text{pile}} - (L1 + L2 + L3) - L7]}{3} = 0.496 \text{ m} \quad L5 := L4 \quad L6 := L4$$

$$L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 = 5.921 \text{ m Tarkistus}$$

Paalun materiaali- ja geometriset ominaisuudet RR90

$$t_{\text{corr}} := 0 \text{ mm}$$

$$d_{\text{eff}} := d - 2t_{\text{corr}} \quad t_{\text{eff}} := t - t_{\text{corr}} = 6.3 \text{ mm} \quad d_{\text{eff}} = 88.9 \text{ mm}$$

$$f_{\text{ypile}} := 440 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad E := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$I := \frac{\pi}{64} [d_{\text{eff}}^4 - (d_{\text{eff}} - 2t_{\text{eff}})^4] = 1402361 \text{ mm}^4 \quad A_{\text{eff}} := \frac{\pi}{4} [d_{\text{eff}}^2 - (d_{\text{eff}} - 2t_{\text{eff}})^2] = 1635 \text{ mm}^2$$

$$W_{el} := \frac{2 \cdot I}{d_{eff}} = 31549 \cdot \text{mm}^3$$

$$E \cdot I = 294 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^2 \quad \text{Paalun taivutusjäykkyys}$$

$$M_y := f_{ypile} \cdot W_{el} = 13.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Paalun myötömomentti}$$

$$M_u := 1.2 f_{ypile} \cdot W_{el} = 16.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{Paalun plastinen momentti}$$

$$k_{s2} := 150 \cdot \frac{c_{u2}}{d} = 3.4 \cdot \frac{\text{MN}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Alustaluku välillä k4-k7}$$

$$k_s := 150 \cdot \frac{c_u}{d} = 25.3 \cdot \frac{\text{MN}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Alustaluku välillä k1-k4}$$

Maaperän jousivakioiden laskenta

$$k7 := 0.5 \cdot L6 \cdot d \cdot k_{s2} + 0.5 \cdot L7 \cdot d \cdot k_{s2}$$

$$k6 := 0.5 \cdot L5 \cdot d \cdot k_{s2} + 0.5 \cdot L6 \cdot d \cdot k_{s2}$$

$$k5 := 0.5 \cdot L4 \cdot d \cdot k_{s2} + 0.5 \cdot L5 \cdot d \cdot k_{s2}$$

$$k4 := 0.5 \cdot L3 \cdot d \cdot k_s + 0.5 \cdot L4 \cdot d \cdot k_{s2}$$

$$k3 := 0.5 \cdot L2 \cdot d \cdot k_s + 0.5 \cdot L3 \cdot d \cdot k_s$$

$$k2 := 0.5 \cdot L1 \cdot d \cdot k_s + 0.5 \cdot L2 \cdot d \cdot k_s$$

$$k1 := (0.5 \cdot L1) \cdot d \cdot k_s$$

Yksiköiden poisto, arvot N ja m muodossa (MathCadin takia)

$$\frac{E}{\text{UnitsOf}(E)}$$

$$\frac{I}{\text{UnitsOf}(I)}$$

$$\frac{L1}{\text{UnitsOf}(L1)}$$

$$\frac{L2}{\text{UnitsOf}(L2)}$$

$$\frac{L5}{\text{UnitsOf}(L5)}$$

$$\frac{k1}{\text{UnitsOf}(k1)}$$

$$\frac{k2}{\text{UnitsOf}(k2)}$$

$$\frac{W}{\text{UnitsOf}(W)}$$

$$\frac{L3}{\text{UnitsOf}(L3)}$$

$$\frac{L6}{\text{UnitsOf}(L6)}$$

$$\frac{k3}{\text{UnitsOf}(k3)}$$

$$\frac{k4}{\text{UnitsOf}(k4)}$$

$$\frac{k5}{\text{UnitsOf}(k5)}$$

$$\frac{L4}{\text{UnitsOf}(L4)}$$

$$\frac{L7}{\text{UnitsOf}(L7)}$$

$$\frac{k6}{\text{UnitsOf}(k6)}$$

$$\frac{k7}{\text{UnitsOf}(k7)}$$

$$\frac{L_{pile}}{\text{UnitsOf}(L_{pile})}$$

$$EI := E \cdot I = 2.945 \times 10^5$$

Kootaan jouset suoraan globaalin koordinaatiston mukaisen jäykkyyssmatrisiin

$$\text{Jouset} := \begin{pmatrix} k1 + \text{disp}_1 \cdot 10^{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k2 + k_{\text{extra}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k3 + k_{\text{extra}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k4 + k_{\text{extra}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Kootaan paalua kuvaavat palkkielementit gobaalikoordinaatistoon

$$k_{e2}(L, \alpha) := \text{trans2}^T \cdot k_2(L, \alpha) \cdot \text{trans2}$$

$$k_{e1}(L) := \text{trans1}^T \cdot k_1(L) \cdot \text{trans1}$$

$$k_{e3}(\beta, L) := \text{trans3}^T \cdot k_3(\beta, L) \cdot \text{trans3}$$

$$k_{e4}(L) := \text{trans4}^T \cdot k_4(L) \cdot \text{trans4}$$

$$k_{e5}(L) := \text{trans5}^T \cdot k_5(L) \cdot \text{trans5}$$

$$k_{e6}(L) := \text{trans6}^T \cdot k_6(L) \cdot \text{trans6}$$

$$k_{e7}(L) := \text{trans7}^T \cdot k_7(L) \cdot \text{trans7}$$

Kootaan gobaali jäykkyyssmatriisi K

$$K := k_{e2}(L2, \alpha) + k_{e1}(L1) + k_{e3}(\beta, L3) + k_{e4}(L4) + k_{e5}(L5) + k_{e6}(L6) + k_{e7}(L7) + \text{Jouset}$$

Globaali jäykkyysmatriisi K (16 x16)

Sarakkeiden ja rivien numerointi vastaa vapausasteiden numerointia

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1·10 ¹⁵	4,144·10 ⁵	-4,013·10 ⁵	4,144·10 ⁵	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4,144·10 ⁵	5,705·10 ⁵	-4,144·10 ⁵	2,852·10 ⁵	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-4,013·10 ⁵	-4,144·10 ⁵	7,915·10 ⁶	1,543·10 ⁶	-4,122·10 ⁶	1,958·10 ⁶	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4,144·10 ⁵	2,852·10 ⁵	1,543·10 ⁶	1,81·10 ⁶	-1,958·10 ⁶	6,2·10 ⁵	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	-4,122·10 ⁶	-1,958·10 ⁶	9,85·10 ⁶	-1,909·10 ⁵	-3,534·10 ⁶	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1,958·10 ⁶	6,2·10 ⁵	-1,909·10 ⁵	2,418·10 ⁶	-1,767·10 ⁶	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	-3,534·10 ⁶	-1,767·10 ⁶	3,371·10 ⁷	7,186·10 ⁶	-2,898·10 ⁷	7,186·10 ⁶	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	7,186·10 ⁶	2,376·10 ⁶	-7,186·10 ⁶	1,188·10 ⁶	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	-2,898·10 ⁷	-7,186·10 ⁶	5,811·10 ⁷	0	-2,898·10 ⁷	7,186·10 ⁶	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	7,186·10 ⁶	1,188·10 ⁶	0	4,751·10 ⁶	-7,186·10 ⁶	1,188·10 ⁶	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	-2,898·10 ⁷	-7,186·10 ⁶	5,811·10 ⁷	0	-2,898·10 ⁷	7,186·10 ⁶	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	7,186·10 ⁶	1,188·10 ⁶	0	4,751·10 ⁶	-7,186·10 ⁶	1,188·10 ⁶	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2,898·10 ⁷	-7,186·10 ⁶	7,738·10 ⁷	2,91·10 ⁶	-4,827·10 ⁷	1,01·10 ⁷
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,186·10 ⁶	1,188·10 ⁶	2,91·10 ⁶	5,191·10 ⁶	-1,01·10 ⁷	1,408·10 ⁶
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4,827·10 ⁷	-1,01·10 ⁷	4,827·10 ⁷	-1,01·10 ⁷
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,01·10 ⁷	1,408·10 ⁶	-1,01·10 ⁷	2,816·10 ⁶

K =

Jousien voimat [N]

$$F_7 := k_7 \cdot U_{13} = 2104$$

$$F_6 := k_6 \cdot U_{11} = 1360$$

$$F_5 := k_5 \cdot U_9 = 578$$

$$F_4 := k_4 \cdot U_7 = -920$$

$$F_3 := k_3 \cdot U_5 = -696$$

$$F_2 := k_2 \cdot U_3 = 36$$

$$F_1 := k_1 \cdot U_1 = 0$$

Lasketaan elementtien alueessa sisäiset rasitukset

$$Q_e(x) := F_1 - q_e \cdot x \quad M_e(x) := F_1 \cdot x - M_1 - q_e \frac{x^2}{2} \quad v_e(x) := \frac{-1}{EI} \left(\frac{1}{6} \cdot x^3 \cdot F_1 - \frac{1}{2} \cdot M_1 \cdot x^2 - \frac{q_e \cdot x^4}{24} + E \cdot I \cdot \phi_1 \cdot x + E \cdot I \cdot v_1 \right)$$

$$x1 := 0, 0.01 \dots L1$$

$$q_e := 0$$

Elementti 1

$$F_{11} := f_{1_1}$$

$$M_{11} := f_{1_2}$$

$$v_{11} := u_{1_1}$$

$$\phi_{11} := u_{1_2}$$

$$Q_{e1}(x1) := \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha = 0 \vee \beta = 0 \\ F_{11} & \text{otherwise} \end{cases} \quad M_{e1}(x1) := \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha = 0 \vee \beta = 0 \\ F_{11} \cdot x1 - M_{11} - q_e \frac{x1^2}{2} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{e1}(x1) := \frac{-1}{EI} \left(\frac{1}{6} \cdot x1^3 \cdot F_{11} - \frac{1}{2} \cdot M_{11} \cdot x1^2 - \frac{q_e \cdot x1^4}{24} + E \cdot I \cdot \phi_{11} \cdot x1 + E \cdot I \cdot v_{11} \right) \cdot m$$

$$x2 := 0, 0.01 \dots L2$$

Elementti 2

$$F_{21} := (f_2)_1$$

$$M_{21} := f_{2_2}$$

$$v_{21} := u_{2_1}$$

$$\phi_{21} := u_{2_2}$$

$$Q_{e2}(x2) := \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha = 0 \vee \beta = 0 \\ F_{21} & \text{otherwise} \end{cases} \quad M_{e2}(x2) := \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha = 0 \vee \beta = 0 \\ F_{21} \cdot x2 - M_{21} & \text{otherwise} \end{cases} \quad v_{e2}(x2) := \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha = 0 \vee \beta = 0 \\ F_{21} \cdot \frac{x2^2}{2} - M_{21} \cdot x2 + E \cdot I \cdot \phi_{21} \cdot x2 + E \cdot I \cdot v_{21} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{e2}(x_2) := \frac{-1}{E \cdot I} \left(\frac{1}{6} \cdot x_2^3 \cdot F_{21} - \frac{1}{2} \cdot M_{21} \cdot x_2^2 - \frac{q_e \cdot x_2^4}{24} + E \cdot I \cdot \phi_{21} \cdot x_2 + E \cdot I \cdot v_{21} \right) \cdot m$$

$$x_3 := 0, 0.01 \dots L_3$$

Elementti 3

$$F_{31} := f_{31} \quad M_{31} := f_{32} \quad v_{31} := u_{31} \quad \phi_{31} := u_{32}$$

$$Q_{e3}(x_3) := \begin{cases} 0 & \text{if } \beta = 0 \\ F_{31} & \text{otherwise} \end{cases} - q_e \cdot x_3 \quad M_{e3}(x_3) := \begin{cases} 0 & \text{if } \beta = 0 \\ F_{31} & \text{otherwise} \end{cases} \cdot x_3 - \begin{cases} 0 & \text{if } \beta = 0 \\ M_{31} & \text{otherwise} \end{cases} - q_e \cdot \frac{x_3^2}{2}$$

$$v_{e3}(x_3) := \frac{-1}{E \cdot I} \left(\frac{1}{6} \cdot x_3^3 \cdot F_{31} - \frac{1}{2} \cdot M_{31} \cdot x_3^2 - \frac{q_e \cdot x_3^4}{24} + E \cdot I \cdot \phi_{31} \cdot x_3 + E \cdot I \cdot v_{31} \right) \cdot m$$

Elementti 4

$$x := 0, 0.01 \dots L_4$$

$$F_{41} := f_{41} \quad M_{41} := f_{42} \quad v_{41} := u_{41} \quad \phi_{41} := u_{42}$$

$$Q_{e4}(x) := F_{41} - q_e \cdot x \quad M_{e4}(x) := F_{41} \cdot x - M_{41} - q_e \cdot \frac{x^2}{2}$$

$$v_{e4}(x) := \frac{-1}{E \cdot I} \left(\frac{1}{6} \cdot x^3 \cdot F_{41} - \frac{1}{2} \cdot M_{41} \cdot x^2 - \frac{q_e \cdot x^4}{24} + E \cdot I \cdot \phi_{41} \cdot x + E \cdot I \cdot v_{41} \right) \cdot m$$

Elementti 5

$$F_{51} := f_{51} \quad M_{51} := f_{52} \quad v_{51} := u_{51} \quad \phi_{51} := u_{52}$$

$$Q_{e5}(x) := F_{51} - q_e \cdot x \quad M_{e5}(x) := F_{51} \cdot x - M_{51} - q_e \cdot \frac{x^2}{2}$$

$$v_{e5}(x) := \frac{-1}{E \cdot I} \left(\frac{1}{6} \cdot x^3 \cdot F_{51} - \frac{1}{2} \cdot M_{51} \cdot x^2 - \frac{q_e \cdot x^4}{24} + E \cdot I \cdot \phi_{51} \cdot x + E \cdot I \cdot v_{51} \right) \cdot m$$

Elementti 6

$$F_{61} := f_{61} \quad M_{61} := f_{62} \quad v_{61} := u_{61} \quad \phi_{61} := u_{62}$$

$$Q_{e6}(x) := F_{61} - q_e \cdot x \quad M_{e6}(x) := F_{61} \cdot x - M_{61} - q_e \cdot \frac{x^2}{2}$$

$$v_{e6}(x) := \frac{-1}{EI} \left(\frac{1}{6} x^3 \cdot F_{61} - \frac{1}{2} M_{61} \cdot x^2 - \frac{q_e x^4}{24} + E \cdot I \cdot \phi_{61} \cdot x + E \cdot I \cdot v_{61} \right) \cdot m$$

Elementti 7

$$x7 := 0,001 \dots L7$$

$$F_{71} := f_{71} \quad M_{71} := f_{72} \quad v_{71} := u_{71} \quad \phi_{71} := u_{72}$$

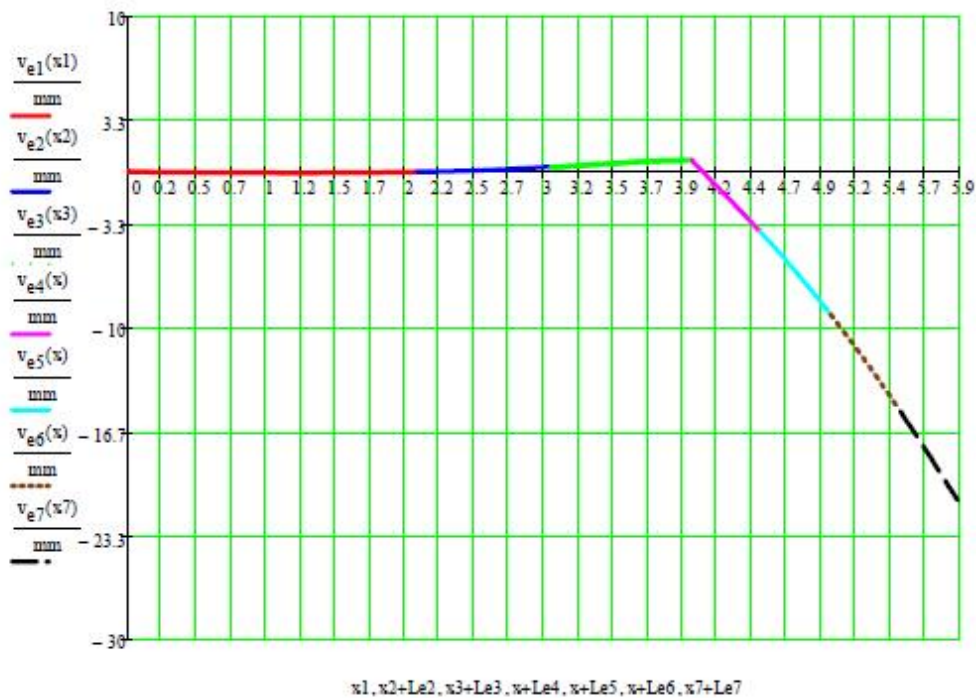
$$Q_{e7}(x7) := F_{71} - q_e \cdot x7 \quad M_{e7}(x7) := F_{71} \cdot x7 - M_{71} - q_e \cdot \frac{x7^2}{2}$$

$$v_{e7}(x7) := \frac{-1}{EI} \left(\frac{1}{7} x7^3 \cdot F_{71} - \frac{1}{2} M_{71} \cdot x7^2 - \frac{q_e x7^4}{24} + E \cdot I \cdot \phi_{71} \cdot x7 + E \cdot I \cdot v_{71} \right) \cdot m \quad v_{e7}(0) = -15,339 \cdot mm$$

Kuvaajien muodostamista varten tarvitaan aputermit

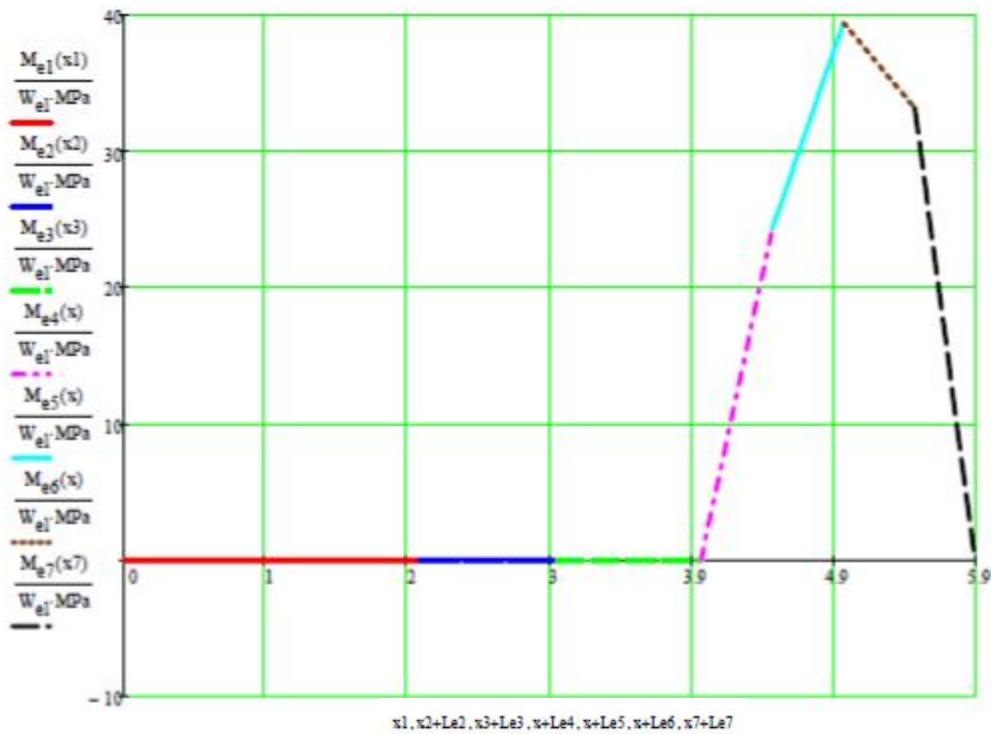
$$\begin{aligned} Le2 &:= L1 & Le3 &:= L2 + L1 & Le4 &:= L3 + L2 + L1 & Le5 &:= L4 + L3 + L2 + L1 & Le6 &:= L5 + L4 + L3 + L2 + L1 \\ & & Le3 &= 3,015 & Le4 &= 4,015 & Le5 &= 4,511 & Le6 &= 5,007 \\ & & & & & & & & Le7 &:= L6 + Le6 = 5,503 \end{aligned}$$

Paalun taipumaviiva



$$v_{e1}(0) = -0 \cdot mm \quad v_{e2}(L2) = 0 \cdot mm \quad v_{e3}(L3) = 1 \cdot mm \quad v_{e7}(0) = -15 \cdot mm \quad v_{e7}(L7) = -21 \cdot mm$$

Paalun taivutusjännityskuvaaja



Paalun leikkausvoimakuvaja

